

Výukové modely pro elektroenergetiku v programu GeoGebra

Educational Models in GeoGebra for Electric
Power Engineering

Tomáš Führer

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D.

Ostrava 2021

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je vytvořit ve volně šiřitelném softwaru GeoGebra grafický výstup. Tento grafický výstup pak může sloužit k lepšímu porozumění dané problematiky vzhledem k interaktivitě a vizuální odezvě. Vizuálně bude zobrazena především problematika fázorových diagramů náhradních schémat, aby bylo možné jednoduše sledovat vlivy změn jednotlivých parametrů náhradního schématu. Přesněji pak tato práce lehce teoreticky rozebere danou problematiku a bude se podrobně věnovat postupu při tvorbě v tomto programu.

Abstract

The main purpose of this bachelor thesis is to create a graphical output in the freely distributable software GeoGebra. This graphical output can then be used to better understand the matter with respect to interactivity and visual response. Phasor diagrams of replacement schemes will be visually displayed, so that it is possible to easily monitor the effects of changes in individual parameters of the replacement schemes. More precisely, this thesis will lightly analyze the issue in theory and will deal in detail with the creation of the diagrams in this program.

Klíčová slova

Proud, Napětí, Vedení, Fázor, Odpor, Indukčnost, Kapacita, Náhradní schéma, Transformátor

Keywords

Current, Voltage, Line, Phasor, Resistance, Inductance, Capacitance, Replacement scheme, Transformer

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval především vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Tadeuszovi Sikorovi, Ph.D. za ochotu, odbornou pomoc při řešení úloh, časovou flexibilitu při konzultacích a trpělivost.

Dále bych rád také poděkoval svým přátelům a rodině za psychickou podporu během celého mého bakalářského studia. Nakonec bych tímto rád poděkoval i všem pedagogům a vyučujícím, se kterými jsem během studia přišel do styku, za jejich ochotu, trpělivost a snahu předat studentům všechny potřebné informace. Obzvláště v této nelehké době za to, že i přes nemožnost účastnit se prezenčního studia se snažili předat co nejvíce informací a udělat výuku co nejefektivnější.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	5
SEZNAM OBRÁZKŮ	6
SEZNAM TABULEK.....	8
1 ÚVOD	9
1.1 GEOGEBRA	9
2 FÁZOROVÉ DIAGRAMY NÁHRADNÍCH SCHÉMAT DLOUHÝCH VEDENÍ	10
2.1 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA	10
2.1.1 Přenosová soustava	10
2.1.2 Distribuční soustava.....	10
2.2 ELEKTRICKÉ PARAMETRY VENKOVNÍHO VEDENÍ	10
2.2.1 Rezistance venkovních vedení.....	10
2.2.2 Indukčnost vedení	11
2.2.3 Kapacita vedení.....	11
2.2.4 Svodová vodivost	12
2.2.5 Transpozice vodičů.....	12
2.3 NÁHRADA VEDENÍ PRVKY SE SOUSTŘEDĚNÝMI PARAMETRY.....	13
2.3.1 Náhradní T článek.....	13
2.3.2 Náhradní Π článek	13
2.3.3 Náhradní Γ článek	14
2.3.4 Náhradní Steinmetzův článek	14
2.4 KONSTRUKCE FÁZOROVÉHO DIAGRAMU V PROGRAMU GEOGEBRA	14
2.4.1 Výchozí veličiny a parametry vedení.....	16
2.4.2 Výpočet svodových proudů a úbytků napětí	18
2.4.3 Výpočet výkonů a dalších parametrů přenosu výkonu	24
2.4.4 Úprava fázorového diagramu do výsledné podoby	25
2.4.5 Porovnání výsledků	28
2.4.6 Publikace aktivit a úkoly pro studenty	28
3 FÁZOROVÝ DIAGRAM 1F TRANSFORMÁTORU	30
3.1 ELEKTRICKÝ STROJ.....	30
3.2 TRANSFORMÁTORY	30
3.2.1 Konstrukce transformátoru.....	30
3.2.2 Princip funkce transformátoru.....	34
3.2.3 Náhradní schéma transformátoru	34
3.3 KONSTRUKCE FÁZOROVÉHO DIAGRAMU NÁHRADNÍHO SCHÉMATU JEDNOFÁZOVÉHO TRANSFORMÁTORU V PROGRAMU GEOGEBRA	34
3.3.1 Stručný popis postupu konstrukce	36
3.3.2 Publikace aktivit a úkoly pro studenty	37
3.4 DIAGRAM TRANSFORMÁTORU $Dz0$	39
4 ROZLOŽENÍ NESOUMĚRNÉ ZÁTĚŽE DO SLOŽKOVÉ SOUSTAVY	41

4.1	TROJFÁZOVÁ SOUSTAVA.....	41
4.2	SYMETRICKÁ SOUSTAVA	41
4.3	NESYMETRICKÁ SOUSTAVA	41
4.4	SLOŽKOVÁ SOUSTAVA.....	42
4.5	PŘEPOČET DO SLOŽKOVÉ SOUSTAVY	42
4.6	TVORBA DIAGRAMU V PROGRAMU GEOGEBRA	43
4.6.1	<i>Popis postupu konstrukce</i>	44
4.6.2	<i>Publikace aktivit a úkoly pro studenty</i>	45
5	ZÁVĚR.....	50
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51
	SEZNAM PŘÍLOH	52

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Popis	Jednotka
a	Operátor natočení	(-)
B	Susceptance	(S) Siemens
C	Kapacita	(F) Farad
d	Střední vzdálenost vodičů	(m) Metr
G	Vodivost	(S) Siemens
G_1	Konduktance	(S) Siemens
I	Proud	(A) Ampér
I_s	Proud procházející konduktancí	(A) Ampér
km	Délka	$(m \cdot 10^3)$
k_s	Činitel zvětšení rezistence	(-)
kV	Napětí	$(V \cdot 10^3)$
L_e	Vnější indukčnost	(H) Henry
L_i	Vnitřní indukčnost	(H) Henry
L_v	Vlastní indukčnost	(H) Henry
l	Délka	(m) metr
M	Vzájemná indukčnost	(H) Henry
P	Činný výkon	(W) Watt
P_s	Výkonová ztráta	(W) Watt
P_x	Činný výkon	(W) Watt
Q_x	Jalový výkon	(var)
R	Činný odpor	(Ω) Ohm
R	Poloměr	(m)
R_{20}	Odpor při teplotě 20°C	(Ω) Ohm
R_{ss}	Odpor při průchodu stejnosměrným proudem	(Ω) Ohm
$R_{stř}$	Odpor při průchodu střídavým proudem	(Ω) Ohm
R_θ	Odpor při dané teplotě	(Ω) Ohm
r	Poloměr	(m) Metr

S	Průřez	(m ²)	
S	Zdánlivý výkon	(VA)	Voltampér
S _x	Zdánlivý výkon	(VA)	Voltampér
T	Desymetrizační matice	(-)	
t	Čas	(s)	Sekunda
U	Napětí	(V)	Volt
U	Sdružené napětí	(V)	Volt
U ₀	Napětí netočivé složky	(V)	Volt
U ₁	Napětí sousledné složky	(V)	Volt
U ₂	Napětí zpětné složky	(V)	Volt
U _f	Fázové napětí	(V)	Volt
U _m	Amplituda napětí	(V)	Volt
U _N	Jmenovité napětí	(V)	Volt
u _a	Okamžitá hodnota napětí fáze A	(V)	Volt
u _b	Okamžitá hodnota napětí fáze B	(V)	Volt
u _c	Okamžitá hodnota napětí fáze C	(V)	Volt
X	Reaktance	(Ω)	Ohm
Z	Impedance	(Ω)	Ohm
α	Teplotní součinitel odporu	(K ⁻¹)	Kelvin na -1
α	Činitel nerovnoměrného rozdělení proudu	(-)	
ΔU	Úbytek napětí	(V)	Volt
ΔP	Výkonová ztráta	(W)	Watt
Δθ	Teplotní rozdíl	(-)	
μ ₀	Permeabilita vakua	(H · m ⁻¹)	
μ _r	Poměrná permeabilita materiálu	(-)	
ξ	Korekční činitel	(-)	
ρ	Měrný elektrický odpor	(Ω · m)	Ohm metr
ρ _u	Činitel nesymetrie	(-)	
ω	Úhlová rychlost	(rad · s ⁻¹)	

Seznam Obrázků

OBR. 1 UKÁZKA TRANSPOZICE VEDENÍ [3]	12
OBR. 2 ROZLOŽENÍ PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO ČLÁNKU T [3]	13
OBR. 3 ROZLOŽENÍ PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO ČLÁNKU Π [3]	13
OBR. 4 ROZLOŽENÍ PARAMETRŮ ČLÁNKU Γ [3]	14
OBR. 5 ROZLOŽENÍ PARAMETRŮ STEINMETZOVA ČLÁNKU [3]	14
OBR. 6 ZÁPIS KONSTRUKCE Z PROGRAMU GEOGEBRA OD BODU 1 DO BODU 38	15
OBR. 7 ZÁPIS KONSTRUKCE Z PROGRAMU GEOGEBRA OD BODU 39 DO BODU 62	16
OBR. 8 VSTUPNÍ POLE PROGRAMU	17
OBR. 9 VZOREC POUŽITÝ PRO VÝPOČET PROUDU I _{7C}	18
OBR. 10 ZÁPIS DO VSTUPNÍHO POLE V PROGRAMU	18
OBR. 11 ZÁPIS DO VSTUPNÍHO POLE PRO PROUD I _{7G}	19

OBR. 12 VÝSLEDNÝ TVAR VZORCE PRO VÝPOČET PROUDU I_{7G}	19
OBR. 13 NÁKRESNA PROGRAMU PO KONSTRUKCI PO BOD 14 ZÁPISU KONSTRUKCE	19
OBR. 14 ZÁPIS DO VSTUPNÍHO POLE PRO VÝPOČET ÚBYTKU NAPĚTÍ NA REZISTANCI $R/2'$	20
OBR. 15 VÝSLEDNÝ TVAR VZORCE PRO $R/2$	20
OBR. 16 ZÁPIS DO VSTUPNÍHO POLE PRO ÚBYTEK NAPĚTÍ NA INDUKČNOSTI $X/2'$	20
OBR. 17 VÝSLEDNÝ TVAR VZORCE PRO ÚBYTEK NAPĚTÍ NA INDUKČNOSTI	20
OBR. 18 NÁKRESNA PROGRAMU PO ZKONSTRUOVÁNÍ BODU 19	21
OBR. 19 VÝSLEDNÝ TVAR VZORCE PRO VÝPOČET PROUDU I_{6C}	21
OBR. 20 ZÁPIS DO VSTUPNÍHO POLE PRO VÝPOČET PROUDU I_{6C}	21
OBR. 21 VÝSLEDNÝ TVAR VZORCE PRO VÝPOČET PROUDU I_{6G}	22
OBR. 22 ZÁPIS DO VSTUPNÍHO POLE PRO VÝPOČET PROUDU I_{6G}	22
OBR. 23 VÝSLEDNÝ TVAR VZORCE PRO ÚBYTEK NAPĚTÍ NA REZISTANCI $R/2''$	22
OBR. 24 ZÁPIS DO VSTUPNÍHO POLE PRO ÚBYTEK NAPĚTÍ NA REZISTANCI $R/2''$	22
OBR. 25 VÝSLEDNÝ TVAR VZORCE PRO ÚBYTEK NAPĚTÍ NA INDUKČNOSTI $X/2''$	22
OBR. 26 ZÁPIS DO VSTUPNÍHO POLE PRO ÚBYTEK NAPĚTÍ NA INDUKČNOSTI $X/2''$	22
OBR. 27 ZÁPIS DO VSTUPNÍHO POLE PRO ÚBYTEK NAPĚTÍ NA INDUKČNOSTI	23
OBR. 28 ZÁPIS DO VSTUPNÍHO POLE PRO ÚBYTEK NAPĚTÍ NA INDUKČNOSTI	23
OBR. 29 ZÁPIS DO VSTUPNÍHO POLE PRO ÚBYTEK NAPĚTÍ NA INDUKČNOSTI	23
OBR. 30 VÝSLEDNÁ PODOBA NÁKRESNY ZOBRAZUJÍCÍ KOMPLETNÍ FÁZOROVÝ DIAGRAM	23
OBR. 31 ZÁPIS DO VSTUPNÍHO POLE PRO VYTVOŘENÍ FÁZOVÉHO POSUNU NA ZAČÁTKU VEDENÍ	24
OBR. 32 PŘÍKLAD ZÁPISU DO VSTUPNÍHO POLE PRO VÝPOČET VÝKONU P_1	25
OBR. 33 VÝBĚROVÉ OKNO PRO DANÝ OBJEKT	25
OBR. 34 NÁSTROJOVÁ LIŠTA PROGRAMU	26
OBR. 35 OKNO PRO VLOŽENÍ TEXTOVÉHO POLE PRO PROUD I_1	26
OBR. 36 NÁKRESNA S TEXTOVÝMI POLI	27
OBR. 37 VÝSLEDNÝ VZHLED NÁKRESNY	27
OBR. 38 FERANTIHO JEV NA STEINMETZOVĚ ČLÁNKU	29
OBR. 39 VEDENÍ VE STAVU BLÍZKÉM PŘIROZENÉMU VÝKONU	29
OBR. 40 MOŽNOSTI USPOŘÁDÁNÍ MAGNETICKÉHO OBVODU [6]	31
OBR. 41 SPOJKA A JÁDRO MAGNETICKÉHO OBVODU [5]	31
OBR. 42 ZPŮSOB SKLÁDÁNÍ PLECHŮ PRO PŘEPLÁTOVANÝ SPOJ [5]	32
OBR. 43 DRUHY PROVEDENÍ CÍVEK [6]	32
OBR. 44 SOUOSÁ VINUTÍ [5]	33
OBR. 45 VINUTÍ PROSTŘÍDANÉ [5]	33
OBR. 46 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU [5]	34
OBR. 47 POUŽITÉ NÁHRADNÍ SCHÉMA JEDNOFÁZOVÉHO TRANSFORMÁTORU	35
OBR. 48 ZÁPIS KONSTRUKCE Z PROGRAMU GEOGEBRA OD BODU 1 DO BODU 34	35
OBR. 49 ZÁPIS KONSTRUKCE Z PROGRAMU GEOGEBRA OD BODU 34 DO BODU 55	36
OBR. 50 VÝSLEDNÝ TVAR FÁZOROVÉHO DIAGRAMU	37
OBR. 51 PŘIBLÍŽENÝ POHLED NA STAV DIAGRAMU NAKRÁTKO (PŘIBLÍŽENO PRO LEPŠÍ ORIENTACI V PROUDECH)	38
OBR. 52 CELKOVÝ TVAR DIAGRAMU PŘI STAVU NAPRÁZDNO (PROUDY NEJSOU ROZLIŠITELNÉ)	38
OBR. 53 TVAR DIAGRAMU PŘI STAVU BLÍZKÉM STAVU NAKRÁTKO	39
OBR. 54 FÁZOROVÝ DIAGRAM TRANSFORMÁTORU $Dz0$	40
OBR. 55 ZÁPIS KONSTRUKCE PRO ROZKLAD DO SLOŽKOVÉ SOUSTAVY OD BODU 1 DO BODU 36	44
OBR. 56 ZÁPIS KONSTRUKCE PRO ROZKLAD DO SLOŽKOVÉ SOUSTAVY OD BODU 37 DO BODU 44	44
OBR. 57 ZÁPIS DO VSTUPNÍHO POLE PROGRAMU	45
OBR. 58 SLOŽKOVÁ SOUSTAVA PŘI PROHOZENÍ SLEDU FÁZÍ	46

<i>OBR. 59 SLOŽKOVÁ SOUSTAVA PŘI PŘEPĚTÍ JEDNÉ FÁZE</i>	<i>47</i>
<i>OBR. 60 SLOŽKOVÁ SOUSTAVA PŘI TĚMĚŘ SYMETRICKÉ ZÁTĚŽI</i>	<i>48</i>
<i>OBR. 61 SLOŽKOVÁ SOUSTAVA PŘI VÝPADKU JEDNÉ FÁZE</i>	<i>49</i>

Seznam Tabulek

<i>TAB. 1 PARAMETRY NAHRAZOVANÉHO VEDENÍ [4]</i>	<i>17</i>
<i>TAB. 2 TABULKA VYPOČTENÝCH HODNOT PRO JEDNOTLIVÉ DRUHY ČLÁNKŮ</i>	<i>28</i>
<i>TAB. 3 TABULKA PARAMETRŮ POUŽITÝCH KE KONSTRUKCI DIAGRAMU [8]</i>	<i>34</i>

1 Úvod

Tato práce se bude věnovat tvorbě fázorových diagramů všech používaných náhradních článků vedení, fázorovému diagramu reálného jednofázového transformátoru, trojfázovému ideálnímu transformátoru a diagramu nesymetrické zátěže. V rámci každé kapitoly bude uveden jak stručný teoretický rozbor, tak podrobný popis postupu při tvorbě těchto diagramů. Součástí bude i tvorba jednoduchých úkolů pro uživatele těchto článků, jejichž cílem bude nasměrování uživatele správným směrem při sledování jednotlivých sounáležitostí v rámci dané problematiky.

1.1 GeoGebra

Geogebra je volně šiřitelný multiplatformní software vytvořen Markusem Hohenwarterem především k usnadnění výuky středoškolské matematiky, který umožňuje graficky zobrazit matematické problémy a pomoci tak studentům danou probíranou látku lépe pochopit. Program umí propojeně pracovat s algebrou, grafikou a tabulkami. Program dále umožňuje uživatelům své výukové materiály zveřejňovat ostatním uživatelům softwaru.

2 Fázorové diagramy náhradních schémat dlouhých vedení

2.1 Elektrizační soustava

Jedná se o soustavu prvků sloužících k přenosu a rozvodu elektrické energie z místa výroby do místa spotřeby. Skládá se ze zdrojové části (tepelné, vodní, jaderné a další elektrárny), sítí, elektrických stanic všeho druhu a spotřebičů elektrické energie

2.1.1 Přenosová soustava

V České republice je tvořena sítěmi 400 a 220 kV a slouží k přenosu silové elektřiny na velké vzdálenosti z místa výroby k velkým transformačním stanicím, odkud se pak dále rozvádí pomocí soustavy distribuční. Provozovatelem přenosové soustavy v České republice je společnost ČEPS, a.s.

Tato přenosová soustava je tvořena 3510 km vedení 400 kV a 1909 km vedení 220 kV. [2]

2.1.2 Distribuční soustava

Slouží k distribuci energie k odběratelům. V České republice se jedná o síť s napětím 110 kV a nižší. Přenáší výkon na kratší vzdálenosti a jsou do ní zapojeny elektrárny nižších výkonů.

Na rozdíl od soustavy přenosové se nejedná o soustavu propojenou, to znamená, že se jednotlivé části distribuční soustavy vzájemně neovlivňují. Provozovateli distribuční soustavy v České republice jsou dle územního rozdělení společnosti ČEZ Distribuce, a.s., E.ON Distribuce, a.s. a PREdistribuce, a.s. [2]

2.2 Elektrické parametry venkovního vedení

Proto, abychom mohli studovat jak magnetické, tak elektrické jevy v obvodech, je potřeba vypočítat parametry daného obvodu, což nám umožní sestavit matematický model.

Základními primárními parametry jsou rezistance, indukčnost (popř. indukční reaktance), konduktance a kapacita (popř. kapacitní susceptance). Zpravidla se určují na jednotku délky vedení. Obdobně tyto veličiny závisí na více vlivech. Obvykle stanovíme jejich hodnoty při zadaných nebo zvolených podmínkách a pro příslušný výpočet je považujeme za konstanty. [2]

2.2.1 Rezistance venkovních vedení

Jinak také činný odpor nebo odpor ohmický. Tato veličina je nejvíce závislá na druhu materiálu vedení, tedy jeho měrném odporu, jeho délce a je nepřímo úměrná průřezu vedení. Pro její základní výpočet tedy platí vztah (2.1)

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (2.1)$$

Rezistance je však teplotně závislou veličinou. Rezistanci udáváme pro teplotu 20 °C. Pokud je teplota jiná, respektujeme změnu odporu pomocí vztahu (2.2) kde R_{20} je hodnota odporu při 20 °C, α je teplotní činitel odporu a $\Delta\vartheta$ je teplotní rozdíl.

$$R_{\vartheta} = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \quad (2.2)$$

Pro přesnost výpočtů se dále zohledňuje vliv skinefektu, neboli povrchového jevu. Povrchový jev znamená, že prochází-li vodičem střídavý proud, není ve vodiči rovnoměrně rozložen jako při průchodu proudem stejnosměrného. Vyjadřuje se zavedením činitele zvětšení rezistance k_s . Platí tedy vztah (2.3)

$$R_{stř} = k_s \cdot R_{ss} \quad (2.3)$$

U průmyslového kmitočtu je však vliv povrchového jevu zanedbatelný. Pokud bychom nadále chtěli výpočet odporu vodiče zpřesňovat, mohli bychom postupně zohlednit i následující skutečnosti: čistota materiálu, kroucení lan, odchylka skutečného průřezu a průhyb. [2]

2.2.2 Indukčnost vedení

Indukčnost je fyzikální veličinou, která vyjadřuje schopnost materiálu protékaného proudem vytvářet kolem sebe magnetické pole. Toto magnetické pole pak ovlivňuje jak vodič samotný (vlastní indukce), tak i vodiče okolní (vzájemná indukce). [2]

U vedení pak rozlišujeme tzv. vlastní indukčnost L_v a indukčnost vzájemnou, kterou pak značíme velkým M . Vlastní indukčnost se skládá z indukčnosti vnitřní L_i a indukčnosti vnější L_e . Na základě těchto poznatků pak dosazujeme do těchto vztahů:

$$L_i = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{8 \cdot \pi} \cdot \alpha \quad (2.4)$$

$$L_e = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \ln \frac{R}{r} \quad (2.5)$$

$$M = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \ln \frac{R}{a} \quad (2.6)$$

Celková indukčnost je pak dána vztahem (2.7)

$$L = L_i + L_e - M \quad (2.7)$$

Po dosazení za μ_0 , zavedením dekadických logaritmů a po úpravách dostáváme vztah (2.8)

$$L = 0,05 \cdot \mu_r \cdot \alpha + 0,46 \log \frac{\alpha}{r} \quad (2.8)$$

A po úpravě se dostaneme k vzorci (2.9)

$$L = 0,46 \log \frac{a}{\xi \cdot r} \quad (2.9)$$

Kde ξ je korekční činitel, který zohledňuje různé typy vodičů, závisí jak na činiteli α tak na permeabilitě materiálu vodiče.

2.2.3 Kapacita vedení

Jak víme ze základů elektrotechniky, dvě desky připojené na potenciál, mezi nimiž se nachází dielektrikum, tvoří kondenzátor, jehož definiční veličinou je kapacita. V případě venkovního vedení nám tento pomyslný kondenzátor tvoří jak kabely vedení vzájemně, tak i kabely vůči zemi. Dielektrikem

v tomto případě je vzduch. Pro hodnotu provozní kapacity jedné fáze transponovaného vedení pak můžeme použít vztah (2.10).

$$C = \frac{0,0242}{\log \frac{d}{r}} \quad (2.10)$$

2.2.4 Svodová vodivost

Svodová vodivost má za následek vznik činných ztrát. Svodová vodivost bývá také jinak označována jako příčné ztráty, nebo konduktance vedení. Tyto činné ztráty však jsou nezávislé na velikosti zatížení sítě, ale závisí především na velikosti napětí a atmosférických podmínkách. Příčné ztráty bývají v porovnání se ztrátami způsobenými rezistancí vodičů zanedbatelné, proto se zpravidla respektují až u sítí, jež mají jmenovité napětí 110 kV a vyšší. Nepříznivý vliv má spíše koróna tvořící se okolo vodičů, která způsobuje rušení. [2]

Svodová vodivost se skládá především ze dvou složek, a to na ztráty svodem přes izolátory a ztráty korónou. Z těchto dvou složek jsou ztráty korónou dominantní, tedy tvoří větší část svodových ztrát.

Ve zcela souměrné síti můžeme ztráty výkonu na 1 km délky vyjádřit pomocí vzorce (2.11)

$$P_s = 3 \cdot U_f \cdot I_s = G_1 \cdot U^2 \quad (2.11)$$

Kde: U_f je hodnota fázového napětí

I_s je hodnota proudu procházející konduktancí

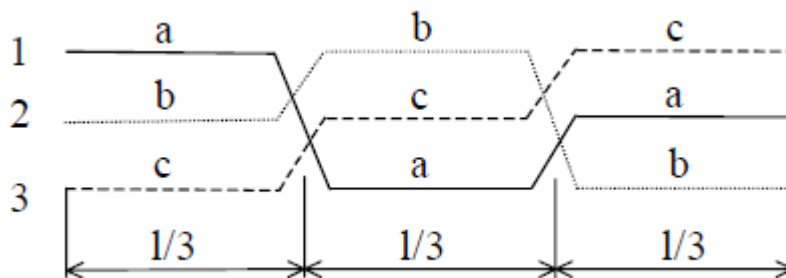
G_1 hodnota konduktance

U je hodnota sdruženého napětí

2.2.5 Transpozice vodičů

Vzdálenost mezi vodiči stejně jakožto jejich vzdálenost od země má vliv jak na jejich indukčnost, tak kapacitu. Pokud necháme vodiče v obecném uspořádání, bude vykazovat nesymetrii jak v podélných, tak i příčných složkách, což by mělo za důsledek snížení účinnosti přenosu.

Z tohoto důvodu se vedení transponuje, tedy kroutí tak, aby každý vodič za jistou jednotku délky vystřídal všechny 3 možné pozice, ve kterých se vůči zbylým vodičům může nacházet. Tímto se pak vyruší rozdíly ve vzájemných indukčnostech a kapacitách mezi vodiči. [2] [3]



Obr. 1 Ukázka transpozice vedení [3]

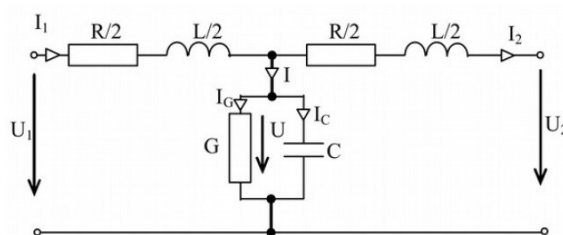
2.3 Náhrada vedení prvky se soustředěnými parametry

Pokud nás při výpočtu jakékoli elektrizační soustavy zajímají pouze hodnoty na začátku a na konci vedení, můžeme ji nahradit útvarem, který má pro jednu fázi dvě svorky vstupní a dvě svorky výstupní. Tento útvar se nazývá dvojbran. Tato metoda je v praxi použitelná zhruba do délky vedení 400 km a oproti metodě exaktní je méně náročná na dobu výpočtu.

Využívá se tří možných článků, kterými jsou články T, Π a Γ . V praxi se pak nejčastěji využívá prvních dvou, tedy T a Π , a to především protože se jedná o souměrné dvojbrany a tedy přesněji reflektují skutečný stav sítě. Při použití těchto článků se nejedná o přesné výpočty sítě, ale spíše o rychlé orientační výpočty. Články T a Π se v praxi používají na vzdušné vedení do délky zhruba 300 až 400 km, přičemž metoda výpočtu pomocí Π článku je o něco přesnější než u článku T. Pro kabelová vedení jsou pak oba články použitelné pro délku vedení do 100 km. Pro článek Γ se vyskytují dvě alternativy použití podle toho, kde je soustředěna příčná admitance. Tento článek je přesný zhruba do 100 km pro vzdušné vedení a pro kabelové vedení je použitelný do 25 km délky. [2] [3]

2.3.1 Náhradní T článek

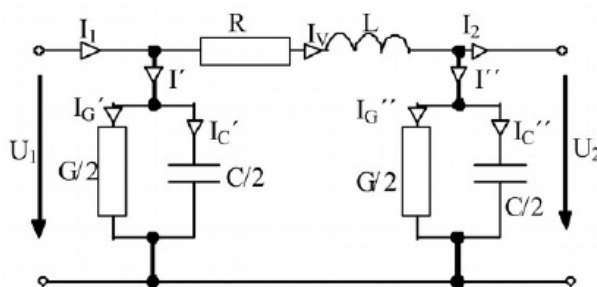
Při náhradě vedení T článkem jsou parametry rozděleny tak, že podélná impedance je souměrně rozložena na začátku a na konci vedení. Příčná admitance je pak soustředěna uprostřed vedení.



Obr. 2 Rozložení parametrů náhradního článku T [3]

2.3.2 Náhradní Π článek

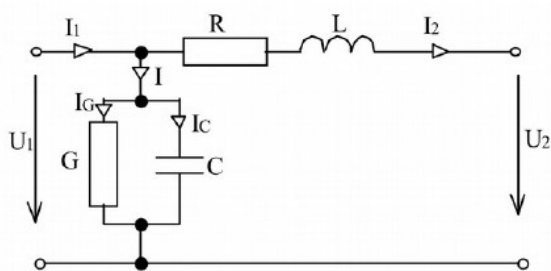
Náhradní článek Π je ze všech uvedených druhů náhradních schémat vedení nejpresnější, co se výpočtu týče. Podélná impedance vedení je zde soustředěna uprostřed a příčná admitance je symetricky rozdělena na začátek a na konec vedení.



Obr. 3 Rozložení parametrů náhradního článku Π [3]

2.3.3 Náhradní Γ článek

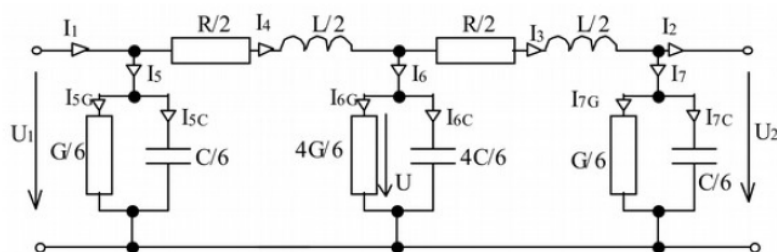
Pro tvar tohoto článku existují v praxi dvě alternativy. Jelikož se nejedná o souměrný dvojbran, příčnou admitanci zde podle potřeby můžeme soustředit buďto na konci, nebo na začátku vedení.



Obr. 4 Rozložení parametrů článku Γ [3]

2.3.4 Náhradní Steinmetzův článek

Tento článek je konstrukčně nejsložitější ze všech používaných náhradních článků, ale zároveň je i nejpresnější. Jedná se o sériovou kombinaci Γ a Π článku.



Obr. 5 Rozložení parametrů Steinmetzova článku [3]

2.4 Konstrukce fázorového diagramu v programu Geogebra

Tato část bakalářské práce se bude zabývat podrobným popisem postupu tvorby fázorového diagramu v programu. Pro tyto účely si na vyfoceném tzv. zápisu konstrukce, který obsahuje jak názvy veličin, tak jejich hodnotu a popis, ukážeme přesný postup krok za krokem, jak jsem při konstrukci fázorových diagramů pro náhradní články vedení postupoval. Zápis konstrukce obsahuje všechny prvky přesném pořadí od začátku konstrukce až po konec. Vložený zápis konstrukce pak bude pouze pro náhradní schéma Steinmetzova článku, protože se jedná o nejsložitější konstrukci a při jeho tvorbě jsou využity všechny postupy, jako u všech ostatních článků.

	Název	Hodnota	Popisek
1	Bod $I_2(142.68, -68.98)$	$I_2 = (142.68, -68.98)$	
2	Vektor i_2	$i_2 = (142.68, -68.98)$	Proud na konci vedení
3	Bod $U_2(230; 0^\circ)$	$U_2 = (230; 0^\circ)$	
4	Vektor u_2	$u_2 = (230, 0)$	Napětí na konci vedení
5	Číslo S	$S = 10$	Měřítka proudu
6	Číslo X	$X = 74.43$	Podélná reaktance [Ω]
7	Číslo R	$R = 4.96$	Podélný odpor [Ω]
8	Číslo B	$B = 1072$	Příčná susceptance [μS]
9	Číslo G	$G = 0.5$	Svodová vodivost [μS]
10	Bod $I_{7C}(142.68, -64.87)$	$I_{7C} = (142.68, -64.87)$	
11	Vektor i_{7C}	$i_{7C} = (0, 4.11)$	Proud svodovou susceptancí
12	Bod $I_{7G}(142.68, -64.87)$	$I_{7G} = (142.68, -64.87)$	
13	Vektor i_{7G}	$i_{7G} = (0, 0)$	Proud svodovou vodivostí
14	Vektor i_3	$i_3 = (142.68, -64.87)$	
15	Bod $U_{R'}(233.54, -1.61)$	$U_{R'} = (233.54, -1.61)$	
16	Vektor $u_{R'}$	$u_{R'} = (3.54, -1.61)$	Úbytek napětí na odporu
17	Bod $U_{X'}(257.68, 51.49)$	$U_{X'} = (257.68, 51.49)$	
18	Vektor $u_{X'}$	$u_{X'} = (24.14, 53.1)$	Úbytek napětí na reaktanci
19	Vektor u	$u = (257.68, 51.49)$	Napětí na prostřední příčné větvi
20	Bod $I_{6C}(139, -46.46)$	$I_{6C} = (139, -46.46)$	
21	Vektor i_{6C}	$i_{6C} = (-3.68, 18.42)$	Proud svodovou susceptancí
22	Bod $I_{6G}(139.01, -46.46)$	$I_{6G} = (139.01, -46.46)$	
23	Vektor i_{6G}	$i_{6G} = (0.01, 0)$	Proud svodovou vodivostí
24	Vektor i_4	$i_4 = (139.01, -46.46)$	
25	Bod $U_{R''}(261.13, 50.34)$	$U_{R''} = (261.13, 50.34)$	
26	Vektor $u_{R''}$	$u_{R''} = (3.45, -1.15)$	Úbytek napětí na odporu
27	Bod $U_1(278.42, 102.07)$	$U_1 = (278.42, 102.07)$	
28	Vektor $u_{X''}$	$u_{X''} = (17.29, 51.73)$	Úbytek napětí na reaktanci
29	Vektor u_1	$u_1 = (278.42, 102.07)$	Napětí na začátku vedení
30	Bod $I_{5C}(137.19, -41.48)$	$I_{5C} = (137.19, -41.48)$	
31	Vektor i_{5C}	$i_{5C} = (-1.82, 4.97)$	Proud svodovou susceptancí
32	Bod $I_1(137.19, -41.48)$	$I_1 = (137.19, -41.48)$	
33	Vektor i_{5G}	$i_{5G} = (0, 0)$	Proud svodovou vodivostí
34	Vektor i_1	$i_1 = (137.19, -41.48)$	Proud na začátku vedení
35	Bod A	$A = (0, 0)$	
36	Úhel φ_1	$\varphi_1 = 36.96^\circ$	Fázový posun na začátku vedení
37	Úhel φ_2	$\varphi_2 = 25.8^\circ$	Fázový posun na konci vedení
38	Úhel $\Delta\varphi$	$\Delta\varphi = 20.13^\circ$	Úhel vedení

Obr. 6 Zápis konstrukce z programu GeoGebra od bodu 1 do bodu 38

39	Číslo P_1	$P_1 = 339615.3$	Činný výkon na začátku vedení
40	Číslo P_2	$P_2 = 328165.74$	Činný výkon na konci vedení
41	Číslo ΔP	$\Delta P = 11449.56$	Výkonová ztráta
42	Číslo Q_1	$Q_1 = 255520.57$	Jalový výkon na začátku vedení
43	Číslo S_1	$S_1 = 425005.07$	Zdánlivý výkon na začátku vedení
44	Číslo Q_2	$Q_2 = 158655.04$	Jalový výkon na konci vedení
45	Číslo S_2	$S_2 = 364505.38$	Zdánlivý výkon na konci vedení
46	Číslo ΔU	$\Delta U = 66.54$	Úbytek napětí
47	Text text1	"U_1 = 296.54 kV"	
48	Text text2	"U_2 = 230 kV"	
49	Text text3	"I_1 = 1433.23 A"	
50	Text text4	"I_2 = 1584.81 A"	
51	Boolovská hodnota a	a = false	Napětí a Proudý
52	Text text5	"P_1 = 339615.3 kW"	
53	Text text6	"Q_1 = 255520.57 kvar"	
54	Text text8	"Q_2 = 158655.04 kvar"	
55	Text text7	"P_2 = 328165.74 kW"	
56	Text text9	"S_1 = 425005.07 kVA"	
57	Text text10	"S_2 = 364505.38 kVA"	
58	Boolovská hodnota b	b = false	Výkony
59	Text text11	" $\Delta U = 66.54$ kV"	
60	Text text12	" $\Delta P = 11449.56$ kW"	
61	Boolovská hodnota c	c = false	Přenos vedení
62	Text text13	" $\Delta \varphi = 20.13^\circ$ "	

Obr. 7 Zápis konstrukce z programu GeoGebra od bodu 39 do bodu 62

2.4.1 Výchozí veličiny a parametry vedení

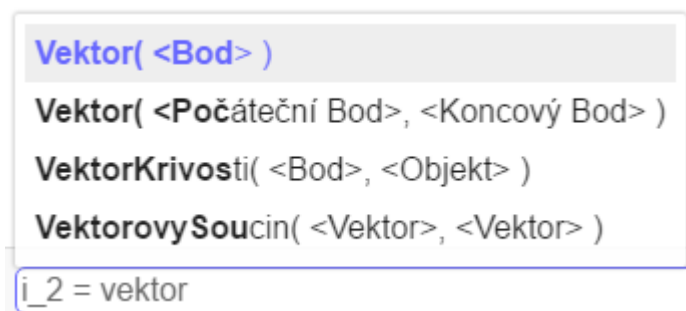
Prvních 9 bodů konstrukce je jakousi základní přípravou pro tvorbu diagramu. Při tvorbě fázorového diagramu je nutné vždy vycházet z hodnot na konci vedení. Proto v prvních 4 krocích konstrukce vytvoříme vektory napětí a proudu na konci vedení, tedy u_2 a i_2 a v dalších krocích si nadefinujeme parametry vedení a měřítko, ve kterém budeme veličiny zobrazovat. Parametry vedení vycházejí ze článku z roku 2009 a tyto parametry jsou uvedeny v **Tab. 1**

Tab. 1 Parametry nahrazovaného vedení [4]

Typ stožáru	portal
Délka vedení	290 km
Napětí vedení U_N (V)	$230 \cdot 10^3$
Podélná rezistence R (Ω)	4,96
Podélná reaktance X (Ω)	74,43
Svodová vodivost G (S)	$0,5 \cdot 10^{-6}$
Příčná kapacitní susceptance B (S)	$1072 \cdot 10^{-6}$

Poslední věcí, kterou je potřeba na začátku udělat, je vybrat vhodné měřítko, aby výsledný fázorový diagram byl dostatečně přehledný. Pro moje články jsem se rozhodl uvádět napětí v kV a proud zobrazovat v desítkách ampér. To nám zajistí nadefinování parametru S , Tímto parametrem v průběhu konstrukce budeme dělit všechny vypočtené proudy, a naopak při výpočtech napětí budeme tímto parametrem násobit hodnotu proudu.

Při tvorbě vektorů proudu a napětí postupujeme téměř totožně. Nejprve vytvoříme bod I_2 pomocí nástroje pro tvorbu bodů nacházejícího se v horní liště programu a pouze jej kurzorem umístíme na nákretnu tak, aby s tímto bodem mohlo být následně pohybováno. V nastavení objektu pak pouze nadefinujeme jeho název, jelikož program defaultně pojmenovává velkými písmeny v abecedním pořadí. Bod A tedy přejmenujeme na bod I_2 . Následuje tvorba vektoru, kterou provedeme zadáním do vstupního pole příkazem vektor a jeho definicí, jak je znázorněno na obrázku 7.



Obr. 8 Vstupní pole programu

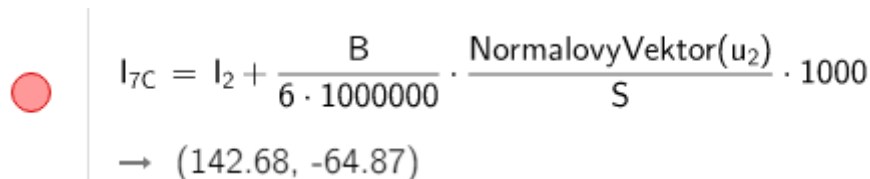
Do vstupního pole vepíšeme, jak chceme, aby se zobrazovaný objekt nazýval a za rovnítko vepíšeme jeho parametry, v tomto případě tedy vektor a z předvolených možností můžeme vybrat první označenou. Za bod označíme dříve vytvořený bod I_2 a potvrdíme vstup. Program s takto nadefinovaným vstupem tedy vytvoří vektor i_2 z počátku souřadnicového systému do bodu I_2 . Následně vytvoříme vektor napětí u_2 . Opět je nejprve potřeba vytvořit bod, ten tentokrát zadáme přímo do vstupního pole obdobně jako při tvorbě vektoru. Zadáme, jak chceme, aby se objekt jmenoval a zadáme jeho definici. V tomto případě tedy bude zápis $U_2 = \text{bod} (230;0)$. Pokud bod zadáme do vstupního pole tímto způsobem, zajistíme, že bod bude umístěn na místě pevně a nebude s ním možno hýbat. Oproti vektoru proudu je totiž velikost napětí pevně dána parametry. Pak už jen obdobným způsobem jako u proudu i_2 vytvoříme vektoru u_2 .

Zbývá nadefinovat parametry vedení a měřítko. Do vstupního pole tedy pouze vepíšeme název veličiny a za rovnítko její hodnotu. Geogebra pak vytvoří posuvník pro možnou následnou změnu této hodnoty. Ten ale můžeme skrýt, jelikož pro naše potřeby nebude manipulace s hodnotami parametrů nutná. Tím máme hotovou první část. Máme vytvořeny výstupní veličiny článku a nadefinované parametry vedení pro výpočet a konstrukci zbytku diagramu.

2.4.2 Výpočet svodových proudů a úbytků napětí

Pro výpočet a konstrukci použijeme schéma článku uvedené na **Obr. 5**, ve kterém jsou označeny všechny veličiny a rozložení prvků tak, jak je dále i v naší konstrukci budeme označovat.

První, co můžeme v náhradním schématu Steinmetzova článku vypočítat, jsou proudy v příčné větvi na konci článku, jelikož na těchto prvcích bude na obou rozložené napětí U_2 , jehož velikost známe. Vzhledem k tomu, že velikost všech prvků vedení máme uvedenou v ohmech, jedná se aplikaci Ohmova zákona. Další znalostí, kterou využijeme, je znalost operace s vektory. Cílem je získat velikosti svodových proudů I_{7C} a I_{7G} podle schématu uvedeného v obrázku výše. Vektorovým součtem těchto dvou vektorů a vektoru I_2 získáme proud I_3 , který využijeme následně pro výpočet úbytku napětí na prvcích v podélné větvi na pravé části článku. Na náhradním schématu je také vidět, v jakém poměru jsou parametry vedení rozděleny. Začneme tedy výpočtem proudu I_{7C} . Výsledný vzorec je vidět na obrázku níže.



$$I_{7C} = I_2 + \frac{B}{6 \cdot 1000000} \cdot \frac{\text{NormalovyVektor}(u_2)}{S} \cdot 1000$$

$$\rightarrow (142.68, -64.87)$$

Obr. 9 Vzorec použitý pro výpočet proudu I_{7C}

Proud I_{7C} je proud příčnou susceptancí B a při jeho součtu s proudem I_{7G} a I_2 pak získáme proud I_3 . Vzorec je tedy součtem proudu I_2 a využití Ohmova zákona a znalosti základních principů elektrotechniky, kde víme, že na čistě kapacitní zátěži bude proud o 90° předbíhat napětí. Kapacitní susceptanci tedy podělíme 6, abychom respektovali správné rozložení prvků a podělíme 10^6 abychom susceptanci převedli na základní jednotku. Susceptance vynásobená velikostí normálového vektoru u_2 , což nám bude respektovat předbíhání proudu napětí o 90° , jelikož normálový vektor je vždy vektorem kolmým na daný vektor. Napětí ještě násobíme 10^3 , abychom počítali v základních jednotkách a podělíme činitelem proudu S , aby bylo zachováno na začátku zvolené měřítko. Samotný zápis do vstupního pole je na obrázku níže.

Definice:



$$I_{2} + B / (6 \cdot 1000000) \text{NormalovyVektor}(u_{2}) / S \cdot 1000$$

Obr. 10 Zápis do vstupního pole v programu


Následně téměř totožným postupem vytvoříme i proud svodovou vodivostí této příčné větve, tedy I_{7G} . Zápis je téměř totožný, ale místo I_2 dosadíme v předchozím kroku vypočtený proud I_{7C} , aby proud vektorově vycházel z tohoto bodu, místo příčné kapacitní susceptance dosadíme svodovou vodivost G . Převedení na základní jednotky a podíl proudovým měřítkem zůstává stejný. Poslední rozdíl je, že

nepoužijeme funkci normálového vektoru, protože počítáme proud na čistě odporové zátěži, a tedy tento proud bude ve fázi s napětím na tomto prvku. Vektor tohoto proudu I_{7G} tedy bude rovnoběžný s vektorem u_2 . Pak už zbývá pouze vytvořit vektory, protože tímto výpočtem získáme pouze body respektující umístění tohoto proudu na nákresně. Na rozdíl od vektoru proudu i_2 nyní však pro tyto vektory použijeme možnost, kdy vektor definujeme počátečním a koncovým bodem. Tato možnost je taktéž vidět v nabídce na obr 7. Výsledný tvar použitého vzorce a jeho zápis do vstupního pole jsou vidět na **Obr. 11** a **Obr. 12**.

Definice:

$$I_{7C} + G / (6 \cdot 1000000) u_2 / S \cdot 1000$$

Obr. 11 Zápis do vstupního pole pro proud I_{7G}

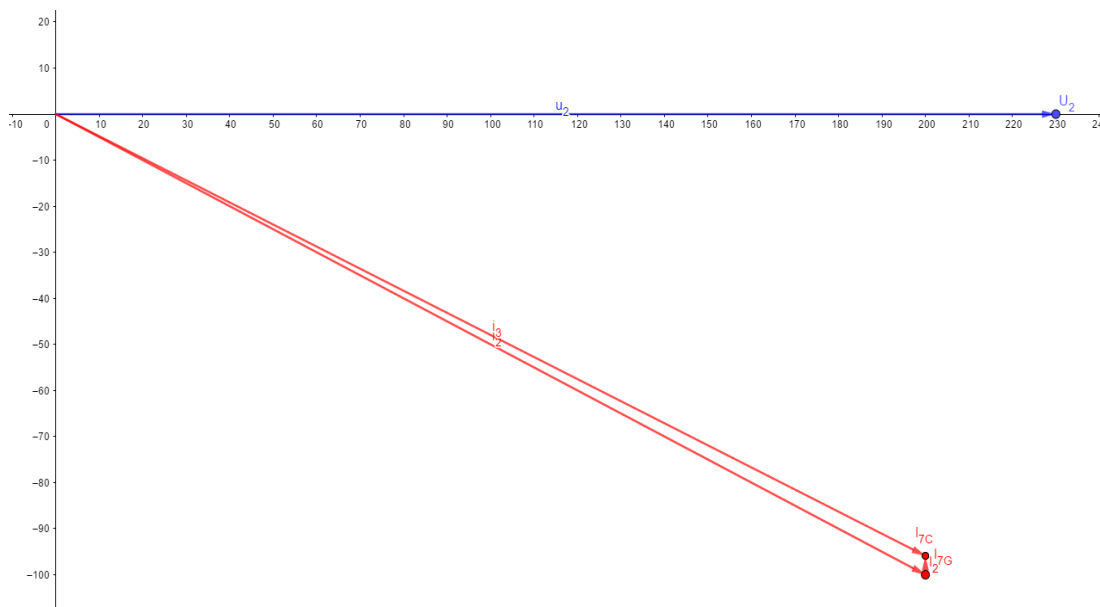


$$I_{7G} = I_{7C} + \frac{G}{6 \cdot 1000000} \cdot \frac{u_2}{S} \cdot 1000$$

$$\rightarrow (200, -95.89)$$

Obr. 12 Výsledný tvar vzorce pro výpočet proudu I_{7G}

Pokračujeme vytvořením vektoru i_3 . Postup při jeho tvorbě je totožný s tvorbou vektoru i_2 , tento proud taktéž vychází z počátku souřadnicového systému a končí v bodě I_{7G} . Tento proud tedy vzniká součtem vektorů proudu i_2 , i_{7C} a I_{7G} .



Obr. 13 Nákresna programu po konstrukci po bod 14 zápisu konstrukce

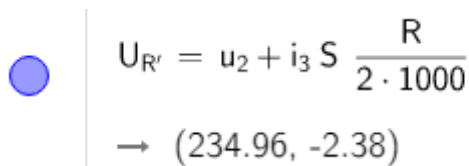
Při tvorbě ostatních veličin ve fázorovém diagramu pak už v podstatě jen kopírujeme dosavadní postup. Když nyní známe velikost a souřadnice proudu i_3 , který prochází pravou částí podélné větve, můžeme vypočítat a na nákresnu zobrazit úbytky napětí na těchto prvcích. Tedy úbytek na rezistoru $R/2$ a indukčnosti $L/2$. Známe totiž parametry těchto prvků a proud, který jimi prochází. Budeme tedy opět kombinovat vektorový součet, Ohmův zákon a znalosti vlastností čistě induktivních a čistě odporových

prvků. Nesmíme zapomenout respektovat měřítko, tedy ve vzorci respektujícím Ohmův zákon vynásobit vektor proudu jeho měřítkem S a výsledné napětí pak ještě podělit 1000, aby výsledná velikost byla v kV. Vypočteme tedy souřadnice těchto úbytků napětí a vytvoříme jejich vektory. Výsledný tvar vzorců, jejich tvar ve vstupním poli a jejich výsledný tvar na nákrese bude je vidět níže na **Obr. 14** až **Obr. 17**.

Definice:

$$u_{\{2\}} + i_{\{3\}} S R / (2 * 1000)$$

Obr. 14 Zápis do vstupního pole pro výpočet úbytku napětí na rezistanci $R/2$



$$U_{R'} = u_2 + i_3 S \frac{R}{2 \cdot 1000}$$

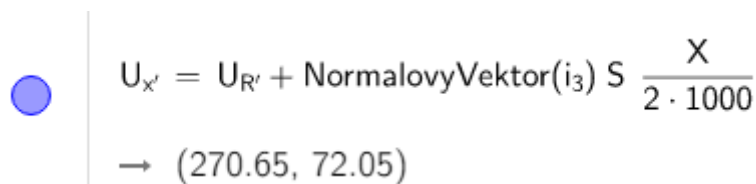
$$\rightarrow (234.96, -2.38)$$

Obr. 15 Výsledný tvar vzorce pro $R/2$

Definice:

$$U_{\{R\}} + \text{NormalovyVektor}(i_{\{3\}}) S X / (2 * 1000)$$

Obr. 16 Zápis do vstupního pole pro úbytek napětí na indukčnosti $X/2$

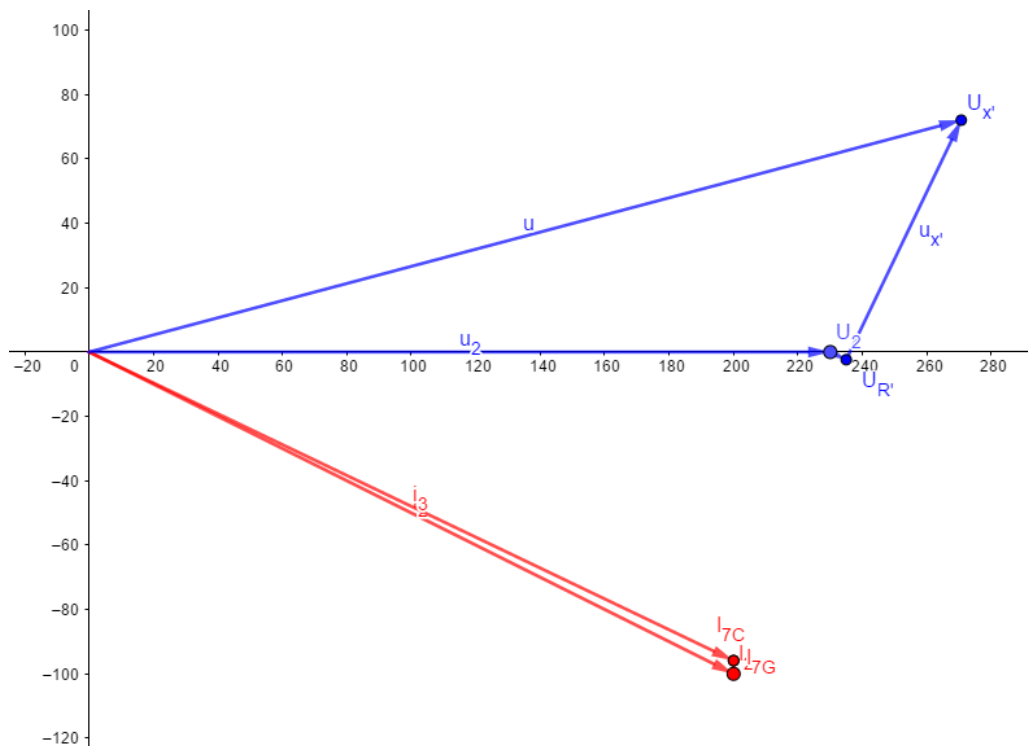


$$U_{X'} = U_{R'} + \text{NormalovyVektor}(i_3) S \frac{X}{2 \cdot 1000}$$

$$\rightarrow (270.65, 72.05)$$

Obr. 17 Výsledný tvar vzorce pro úbytek napětí na indukčnosti

Na obrázcích výše si opět můžeme všimnout, že vektory navazují na sebe, tedy $U_{R'}$ vychází z u_2 a $U_{X'}$ vychází již z vypočteného $U_{R'}$. Při Výpočtu u obou vycházíme z velikosti proudu i_3 , který jimi prochází a u výpočtu úbytku na indukčnosti opět využijeme funkce normálového vektoru, abychom respektovali čistě induktivní prvek, na kterém napětí bude přebíhat proud o 90° . Zbývá opět vytvořit vektory těchto proudů. Tedy vektor $u_{R'}$ vedoucí z bodu U_2 do bodu $U_{R'}$, vektor $u_{X'}$ z bodu $U_{R'}$ do bodu $U_{X'}$. V posledním kroku v této části vytvoříme napětí u , jeho vektor vede z počátku souřadnicového systému do bodu $U_{X'}$. Vzhled fázorového diagramu po tomto kroku je vidět na obrázku níže.



Obr. 18 Náskresna programu po zkonstruování bodu 19

Nyní už jen opakujeme postup téměř totožně jako v předchozích krocích. Když tedy nyní známe velikost a úhel napětí u , které je dle schématu rozprostřeno na prostřední příčné větvi, můžeme opět aplikací Ohmova zákona a základních operací s vektory získat velikosti proudů I_{6C} a I_{6G} . Vytvoříme jejich vektory. Jejich vektorovým součtem pak získat velikost proudu I_4 . Jehož vektor opět vychází z počátku souřadnicového systému. Tento proud pak víme, že prochází prvky levé části podélné větve a můžeme vypočítat rozložení napětí na nich. Přičtením těchto úbytků napětí k vektoru napětí u získáme napětí U_1 , které je na začátku vedení, toto napětí je pak rozprostřeno na levé příčné větvi, takže můžeme vypočítat tyto svodové a kapacitní proudy a získat i proud I_1 na začátku vedení. Při tvorbě těchto vektorů opět nesmíme zapomenout zohlednit měřítko, převod na základní jednotky a rozdělení parametrů dle náhradního schématu. Zápisy do vstupního pole, výsledné tvary vzorců a tvar fázorového diagramu jsou uvedeny na obrázcích níže.

●
$$I_{6C} = i_3 + \frac{4B}{6 \cdot 1000000} \cdot \frac{\text{NormalovyVektor}(u)}{S} \cdot 1000$$


$$\rightarrow (139, -46.46)$$

Obr. 19 Výsledný tvar vzorce pro výpočet proudu I_{6C}

Definice:

$$i_{\{3\}} + (4B) / (6 * 1000000) \text{NormalovyVektor}(u) / S * 1000$$

Obr. 20 Zápis do vstupního pole pro výpočet proudu I_{6C}



$$I_{6G} = I_{6C} + \frac{4G}{6 \cdot 1000000} \cdot \frac{u_2}{S} \cdot 1000$$


$$\rightarrow (139.01, -46.46)$$

Obr. 21 Výsledný tvar vzorce pro výpočet proudu I_{6G}

Definice:

$$I_{6C} + (4G) / (6 * 1000000) u_{2} / S * 1000$$

Obr. 22 Zápis do vstupního pole pro výpočet proudu I_{6G}



$$U_{R''} = u + i_4 S \frac{R}{2 \cdot 1000}$$


$$\rightarrow (261.13, 50.34)$$

Obr. 23 Výsledný tvar vzorce pro úbytek napětí na rezistanci $R/2''$

Definice:

$$u + i_{4} S R / (2 * 1000)$$

Obr. 24 Zápis do vstupního pole pro úbytek napětí na rezistanci $R/2''$



$$U_1 = U_{R''} + \text{NormalovyVektor}(i_4) S \frac{X}{2 \cdot 1000}$$

$$\rightarrow (278.42, 102.07)$$

Obr. 25 Výsledný tvar vzorce pro úbytek napětí na indukčnosti $X/2''$

Definice:

$$U_{R''} + \text{NormalovyVektor}(i_{4}) S X / (2 * 1000)$$

Obr. 26 Zápis do vstupního pole pro úbytek napětí na indukčnosti $X/2''$

Zde pro přehlednost článku se výsledný vzniklý bod nejmenuje $U_{X''}$, ale byl zvolen název U_1 pro přehlednost článku, protože do tohoto bodu bude směřovat vektor výsledného napětí na začátku vedení u_1 . Samotný vektor úbytku na této části podélné reaktance je tedy ve fázorovém diagramu označen $u_{X''}$, ovšem bod, do kterého tento vektor směřuje se již od ostatních případů nejmenuje stejně, tedy $U_{X''}$, ale U_1 .

$$I_{5C} = i_4 + \frac{B}{6 \cdot 1000000} \cdot \frac{\text{NormalovyVektor}(u_1)}{S} \cdot 1000$$

$$\rightarrow (137.19, -41.48)$$

Obr. 27 Zápis do vstupního pole pro úbytek napětí na indukčnosti

Definice:

$$i_{\{4\}} + B / (6 * 1000000) \text{NormalovyVektor}(u_{\{1\}}) / S * 1000$$

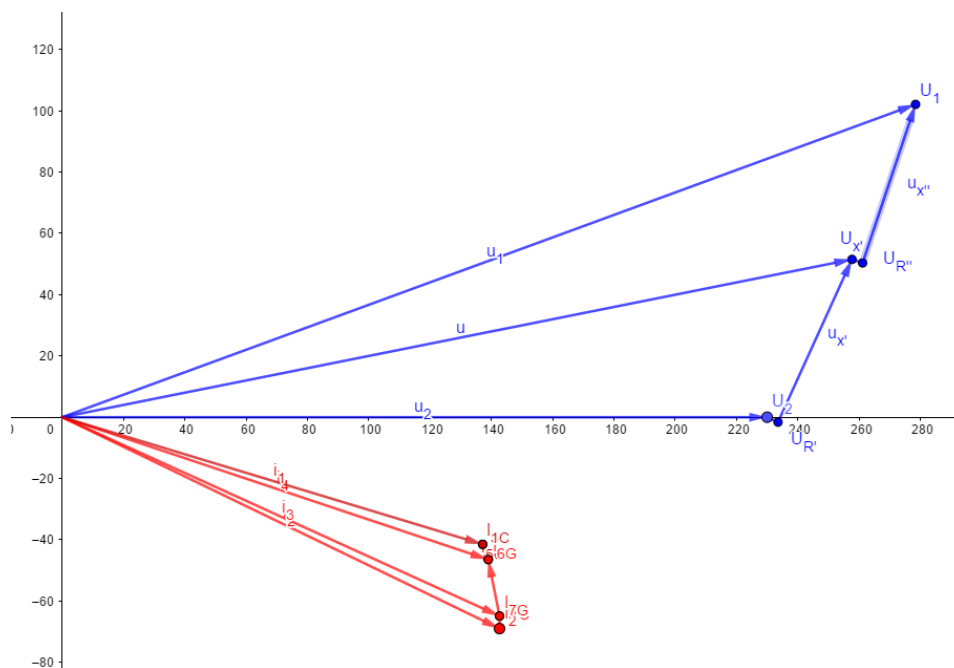
Obr. 28 Zápis do vstupního pole pro úbytek napětí na indukčnosti

$$I_1 = I_{5C} + \frac{G}{6 \cdot 1000000} \cdot \frac{u_2}{S} \cdot 1000$$

$$\rightarrow (137.19, -41.48)$$

Obr. 29 Zápis do vstupního pole pro úbytek napětí na indukčnosti

V tomto případě pro proud svodovou vodivostí I_{5G} nastává stejná situace jako u napětí $U_{X''}$, tedy výsledný bod sloužící jako koncový bod vektoru i_{5G} se nenazývá I_{5G} , ale I_1 pro výslednou přehlednost celého fázorového diagramu pro uživatele, neboť se jedná o bod, do kterého bude směřovat vektor i_1 zobrazující vektoru proudu na začátku vedení.



Obr. 30 Výsledná podoba náčrtu zobrazující kompletní fázorový diagram

Po zadání všech výše uvedených vzorců, vytvoření vektorů tedy máme hotov fázorový diagram. Nyní co se samotných vektorů týče, pro přehlednost je můžeme barevně odlišit a například u vektorů úbytků napětí na rezistorech nebo u vektorů proudu svodovou vodivostí můžeme skrýt jejich název. Jejich velikost je totiž téměř zanedbatelná a pokud by jejich název byl vidět způsobovalo by to pouze nepřehlednost samostatného článku. Z tohoto důvodu je tedy v daných případech vidět buď to pouze název bodu, nebo název vektoru náležící dané zobrazované veličině. Tímto jsme se dostali v konstrukci po bod 34.

2.4.3 Výpočet výkonů a dalších parametrů přenosu výkonu

V této části je sice hotov funkční fázorový diagram, se kterým lze manipulovat formou změny velikosti proudu a jeho fázového posunu na konci vedení a tím sledovat, jak bude velikost jednotlivých veličin a jejich rozprostření na náhradní parametry reagovat, ale pro praktičtější využití je potřeba zobrazit ještě několik dodatečných veličin, které mohou definovat jak ztrátový výkon, úhel vedení, tak parametry jeho přenosu.

Začneme nadefinováním úhlu fázového posunu jak na začátku, tak na konci vedení. Pro tyto operace si vytvoříme bod A, přes funkci vložení nového bodu a umístíme jej do počátku souřadnicového systému, tento bod poté můžeme skrýt, neboť pro uživatele výsledného diagramu není jeho existence jakkoli důležitá. Následně do vstupního pole zadáme název objektu, jež chceme vytvořit a za rovnítko vepíše o jaký objekt se jedná a jeho parametry. Vytváříme-li tedy úhel ϕ_1 , bude vstup vypadat tak, jak je uvedeno na obrázku níže.

$\phi_1 = \text{Uhel}(\text{<Bod>, <Vrchol>, <Bod> })$

Obr. 31 Zápis do vstupního pole pro vytvoření fázového posunu na začátku vedení

V tomto vstupním poli pak za jednotlivé parametry úhlu doplníme bodu, mezi kterými má být daný úhel. Tedy bodu I_1 , vrcholem A a bodem U_1 . Pak už je potvrdíme vstup a máme vytvořený fázový posun na začátku vedení. Obdobným způsobem vytvoříme i úhel ϕ_2 mezi napětím a proudem na konci vedení a úhel vedení $\Delta \phi$, který je sevřen mezi vektory napětí u_1 a u_2 .

Pokračujeme výpočtem samotných výkonů. Když nyní známe fázové posuny mezi proudy na napětí, využijeme základních znalostí elektrotechniky a pro výpočet činných výkonů, jalových výkonů a zdánlivých výkonů použijeme vzorce uvedené níže.

$$P_x = |i_x| \cdot |u_x| \cdot \cos \varphi_x \cdot S \quad (2.12)$$

$$Q_x = |i_x| \cdot |u_x| \cdot \sin \varphi_x \cdot S \quad (2.13)$$

$$S_x = |i_x| \cdot |u_x| \cdot S \quad (2.14)$$

Kde ve vzorcích za x dosazujeme index 1 nebo 2 podle toho, jestli počítáme výkony na začátku nebo na konci vedení. Používáme absolutní hodnoty vektorů, neboť nás v tomto případě zajímá pouze celková délka vektoru, tedy jen jeho velikost, ne jeho směr. Absolutní hodnotu získáme použitím funkce $\text{abs}(\text{<objekt>})$, kde za objekt dosadíme námi vybraný proud nebo napětí, funkce vyhodnotí pouze jeho velikost. Dále zohledňuje měřítko proudu, jelikož jsou všechny vektory proudu v diagramu 10x menší, vynásobíme celý vzorec činitelem S. Napětí uváděné celou dobu v kV pak nemusíme převádět na základní jednotku, stačí mít na vědomí, že výsledná hodnota bude kW, kvar a kVA.

Definice:

$$\text{abs}(u_{\{1\}}) \text{abs}(i_{\{1\}}) \cos(\varphi_{\{1\}}) S$$

Obr. 32 Příklad zápisu do vstupního pole pro výpočet výkonu P_1

Po výpočtu těchto hodnot se nám na nákrešně nezobrazí žádný objekt, jelikož výsledkem těchto výpočtů není žádný bod, který by bylo možné jakkoli zobrazit. Jedná se tedy pouze o definovanou veličinu, jež má danou hodnotu, která je svázána s tvarem fázorového diagramu, tzn. Budeme-li pohybovat proudem I_2 , budou se měnit i velikosti výkonů jak na začátku, tak na konci vedení. Posledními parametry, které vypočteme jsou úbytek napětí na vedení ΔU a výkonová ztráta ΔP . Pro ně použijeme jednoduché rovnice (2.15) a (2.16)

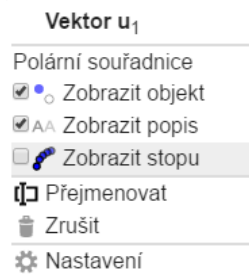
$$\Delta U = |u_1| - |u_2| \quad (2.15)$$

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (2.16)$$

Po vypočtení těchto hodnot opět nesmíme zapomenout na jejich jednotky. Napětí celou dobu počítáme a uvádíme v kV, tedy u úbytek napětí bude v kV. U výkonů, pokud je takto zapíšeme do programu, bude GeoGebra počítat s již dříve vypočtenými hodnotami P_1 a P_2 , které jsou v kW, tedy i ztrátový výkon bude v kW. Nyní tedy máme vytvořenou konstrukci po bod 46.

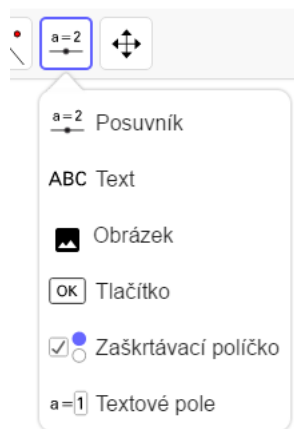
2.4.4 Úprava fázorového diagramu do výsledné podoby

Pro edukativní účely tohoto fázorového diagramu, a všech dalších fázorových diagramů pro náhradní články je ještě potřeba udělat několik vizuálních úprav tak, aby pro koncového uživatele tohoto článku bylo vše přehledné a pochopitelné. Nejprve tedy jak už bylo zmíněno dříve, tak barevně odlišíme vektory proudů a napětí. Následně je potřeba vybrat, které popisy různých objektů na nákrešně je důležité nechat a které můžeme odebrat. Vždy, když se nějakou informací rozhodneme odebrat, musíme myslet na to, aby student, nebo kdokoli jiný pracující s výsledným článkem o tuto informaci zcela nepřišel. K tomuto se uchylujeme především v případě, kdy dva popisy dvou spolu souvisejících objektů jsou situovány velmi blízko sobě. Například u vektorů svodového proudu I_{7G} , kde jeho velikost je téměř zanedbatelná. Skryjeme tedy popis jeho vektoru, ale necháme viditelným popis bodu I_{7G} , aby i přes to, že bez dostatečného přiblížení nákrešny není vidět, bylo stále jasné, že tam tento vektor je. Všechny tyto úpravy, včetně možného přejmenování objektu je možno provádět skrze rozkliknutí objektu pravým tlačítkem myši a výběrem požadované operace z nabídky.



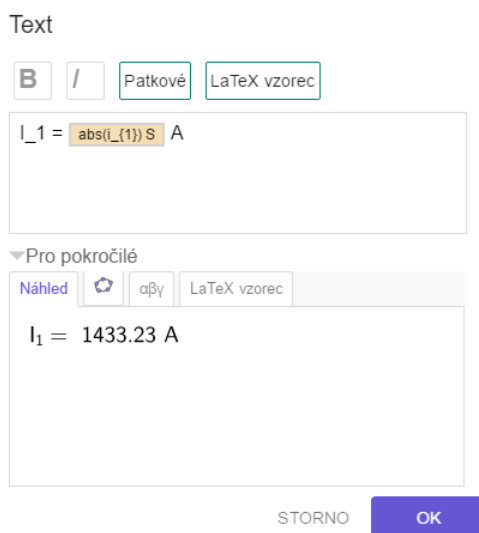
Obr. 33 Výběrové okno pro daný objekt

V bodech zápisu konstrukce 47 až 62 pokračujeme vytvořením textových polí, pomocí kterých zobrazíme na náčrtnu veličiny, které se jinak na náčrtně nezobrazují. Ať už se jedná o přesné velikosti proudů nebo námi vypočtené výkony, postup vytvoření textového pole, které jejich hodnotu zobrazí je totožný. Použijeme pro něj nástroj z horní lišty pro vložení textového pole viz **Obr. 34**



Obr. 34 Nástrojová lišta programu

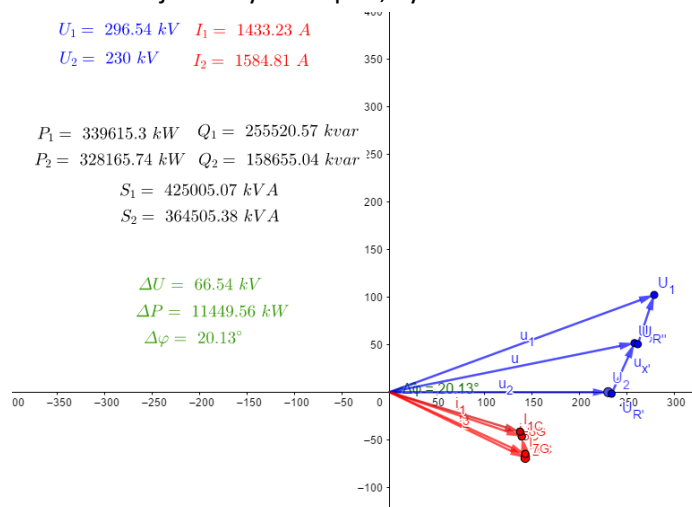
Otevře se nám okno pro tvorbu textu, ve kterém zadáme námi potřebný text a odkážeme se na objekt, který chceme v textu zmínit. I při odkazování se na hodnotou nějakého objektu, můžeme v textovém poli zadat i výpočet nebo nějakou operaci, čehož využijeme například pro zobrazení velikostí proudů, kde stejně jako pro výpočet výkonů použijeme funkci $\text{abs}(\langle \text{objekt} \rangle)$, která nám vrátí pouze velikost vektoru a zároveň tuto velikost vynásobíme měřítkem proudu S . Zadání textového pole je na **Obr. 35**



Obr. 35 Okno pro vložení textového pole pro proud I_1

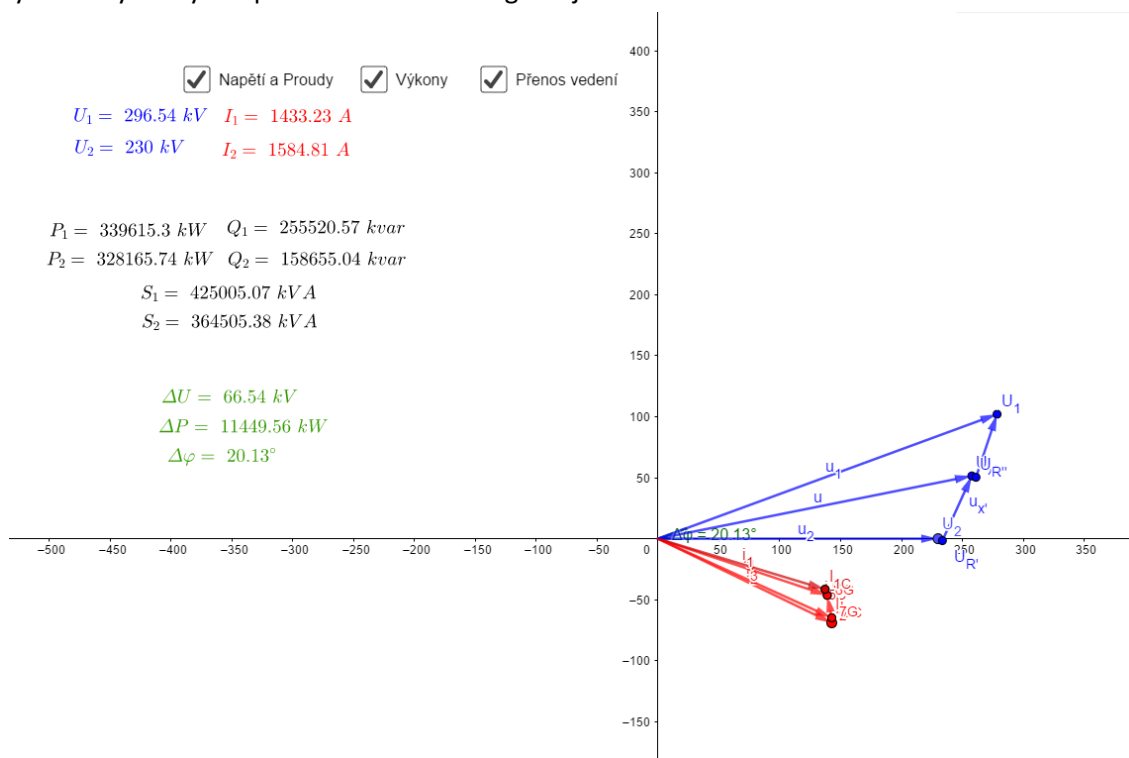
Zadání textového pole potvrdíme a na náčrtně se nám zobrazí dané textové pole, které potřebujeme. Následně s ním můžeme provádět podobné operace jako s ostatními objekty. Můžeme je umístit na vhodné místo, zamknout jejich pozici pevně na obrazovce, aby při přibližování a oddalování náčrtny byly stále na stejném a viditelném místě a případně upravíme barvu textu tak, aby odpovídala barvě popisovaného objektu. Takto tedy na náčrtnu umístíme popis všech veličin,

které chceme zobrazit. V našem případě se jedná o proudy I_1 a I_2 , napětí U_1 a U_2 , činné, jalové a zdánlivé výkony a parametry přenosu vedení jako úbytek napětí, výkonovou ztrátu a úhel vedení.



Obr. 36 Názkresna s textovými poli

Tímto máme téměř hotovo, poslední úpravou je vložení tzv. zaškrťovacích políček. Ty nám zajistí možnost zobrazit si textová pole ve chvíli, kdy nás zajímá hodnota veličin v diagramu a skrýt je, pokud pracujeme s diagramem a zajímá nás pouze jeho tvar. Jejich vložení je ve stejné části jako možnost vložení textu na **Obr. 34**. Otevře se nám okno podobné tomu, na tvorbu textových polí. V něm zapíšeme pouze název políčka a vybereme, které objekty se objeví při jeho zaškrtnutí. Tím máme hotovy všechny kroky v zápisu konstrukce a diagram je hotov.



Obr. 37 Výsledný vzhled názkresny

2.4.5 Porovnání výsledků

V programu GeoGebra byly zpracovány všechny 4 výše uvedené tvary náhradních článků. V tabulce níže jsou uvedeny vypočtené hodnoty při stejné velikosti proudu I_2 a stejném fázovém posunu na konci vedení. Pro každý článek jsem tedy nastavil velikost proudu I_2 na hodnotu 1000 A při účinníku 0,95.

Článek	Γ	T	Π	Steinmetzův
U_2 [kV]	230	230	230	230
I_2 [A]	1000	1000	1000	1000
U_1 [kV]	267,06	257,39	258,38	257,76
I_1 [A]	876,72	914,46	914,41	914,59
P_2 [kW]	218500	218500	218500	218500
Q_2 [kvar]	71817,47	71817,47	71817,47	71817,47
S_2 [kVA]	230000	230000	230000	230000
P_1 [kW]	223494,36	223084,22	223183,98	223095,53
Q_1 [kvar]	69790,02	75060,82	75919,44	76175,53
S_1 [kVA]	234137,51	235373,53	236263,31	235742,07
ΔU [kV]	37,06	27,39	28,38	27,76
ΔP [kW]	4994,35	4584,22	4683,98	4595,52
$\Delta \varphi$ [°]	15,01	15,42	15,67	15,5

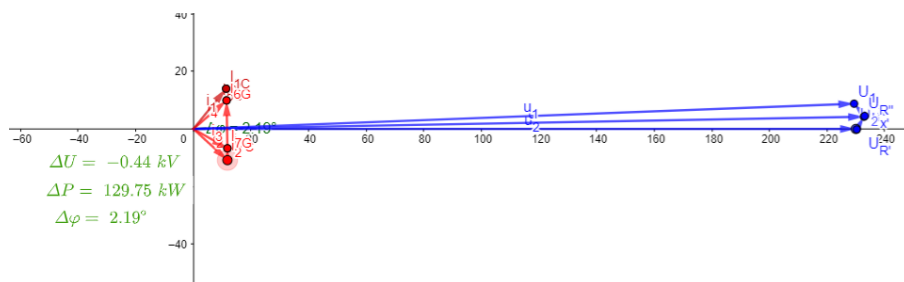
Tab. 2 Tabulka vypočtených hodnot pro jednotlivé druhy článků

Z teoretického rozboru víme, že každý druh náhradního schématu se využívá při různých délkách vedení a pro různé nároky na přesnost výpočtu. Nejpřesnějším je článek Steinmetzův, pokud pak stejné parametry výstupních hodnot vedení zadáme i do ostatních článků, z **Tab. 2** vidíme, že nejbližší se mu hodnotami přibližují články Π a T, zatímco článek Γ na vedení s těmito parametry již ztrácí dostačující přesnost a od Steinmetzova článku se liší znatelněji zhruba jednotkách procent.

2.4.6 Publikace aktivit a úkoly pro studenty

Všechny články byly zveřejněny na stránkách GeoGebry pod mým osobním profilem, na adrese <https://www.geogebra.org/u/fuh0010>. Ke každému z jednotlivých článků byl vložen krátký popis, vysvětlení měřítek, schéma a také úkoly. Úkoly jsou koncipované tak, aby studenti při práci s diagramem pochopili některé základní principy a věděli v jakých místech hledat některé z abnormálních stavů sítě.

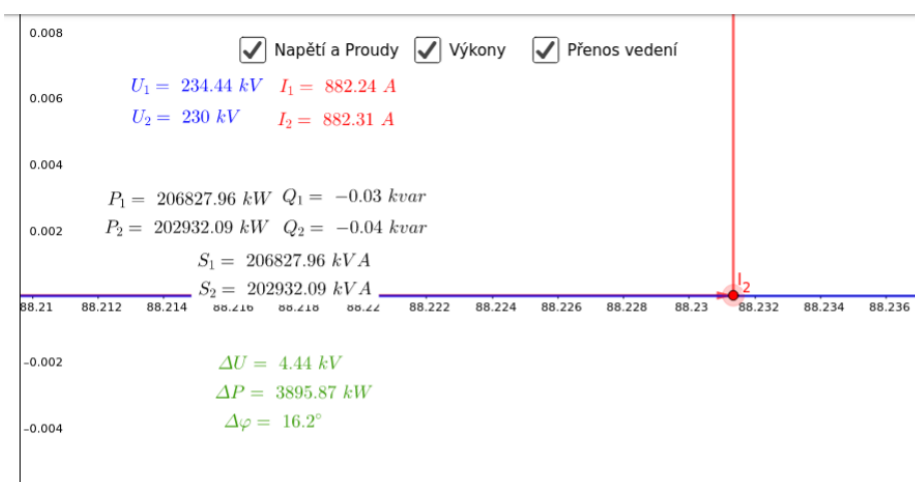
První úloha je najít takový zátěžný proud a fázový posun na konci vedení, kdy se projeví tzv. Ferantiho jev. Ferantiho jev nastává ve chvílích, kdy síť běží ve stavu blízkém stavu naprázdno a ve chvílích, kdy soustava přenáší výkon menší, než je přirozený výkon soustavy. Potom může nastat situace, kdy bude napětí na konci vedení větší než napětí na začátku. Ukazatelem tohoto jevu je pak textové pole ukazující úbytek napětí ΔU , kdy v tomto případě bude ukazovat zápornou hodnotu.



Obr. 38 Ferantiho jev na Steinmetzově článku

Další úlohou je pak najít stav, ve kterém soustava přenáší právě přirozený výkon, tedy přenáší pouze činný výkon a jalový výkon na začátku a konci vedení je shodně 0 kvar. Tento stav je možné najít při vyzoomování.

≡ GeoGebra



Obr. 39 Vedení ve stavu blízkém přirozenému výkonu

3 Fázorový diagram 1f transformátoru

3.1 Elektrický stroj

Elektrickým strojem nazýváme jakékoli zařízení sloužící k přeměně jednoho druhu energie na energii jiného druhu, z nichž alespoň jedna je energie elektrická. Každý elektrický stroj pak ke své funkci využívá zákonů elektromagnetické indukce. Podle několika různých kritérií pak elektrické stroje můžeme rozdělit do několika kategorií. Podle způsobu přeměny energie rozlišujeme motory, generátory a měniče. Podle druhu proudu pak na stroje stejnosměrné, střídavé jednofázové a střídavé vícefázové. Vzhledem k jejich konstrukci a principu funkce pak rozlišujeme transformátory, asynchronní stroje, stroje synchronní, stejnosměrné a stroje střídavé s komutátorem. [5] [6]

3.2 Transformátory

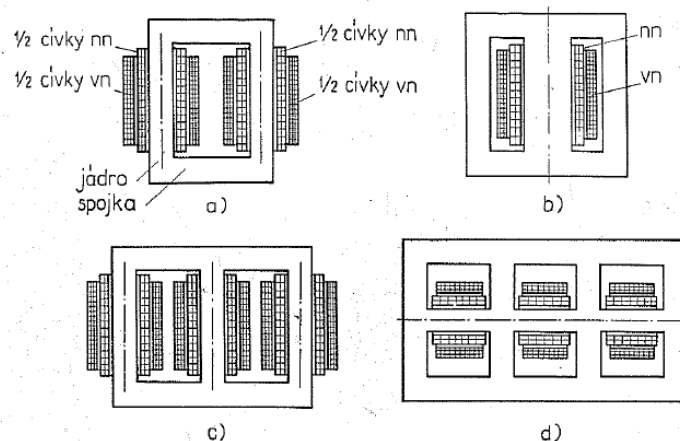
Transformátor je elektrický stroj, který se používá ke změně napětí střídavého proudu při stálém kmitočtu. Pracuje na principu elektromagnetické indukce, ale bez točivého pohybu. [5]

Při výrobě elektrické energie pomocí alternátorů je nejvýhodnější použití generovaných napětí od 6 do 25kV. Pokud bychom však přenášeli výkon na dlouhé vzdálenosti pod tímto napětím docházelo by k obrovským ztrátám především ve formě Joulova tepla. Proto se u míst výroby nachází zvyšovací transformátory, které napětí zvýší na hodnoty od 100 do 400kV, které jsou již pro účinný přenos vhodnější. Po přenesení potřebné vzdálenosti pak následuje soustava transformátorů snižovacích, které hodnotu napětí sníží na danou hodnotu, která je vhodná buď pro další distribuční přenos na kratší vzdálenosti, nebo k odběru. [5] [6]

3.2.1 Konstrukce transformátoru

Hlavními částmi technického transformátoru je magnetický obvod, tvořený transformátorovými plechy, a vinutí. Každý transformátor má kromě toho další součásti, které slouží k mechanickému zajištění, izolování, chlazení transformátorů a jiným účelům. [7]

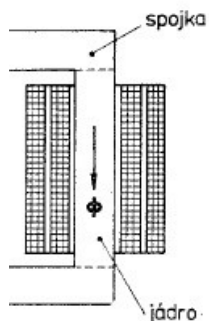
Co se magnetických obvodů transformátorů týče, můžeme je rozlišit na dva základní druhy, jimiž jsou transformátory jádrové a plášťové. Jádrový transformátor je konstruován tak, že vinutí jsou umístěna na jednotlivých jádrech a jsou do magnetického obvodu zapojeny buďto sériově, nebo paralelně. U plášťové konstrukce je magnetický obvod konstruován tak, že částečně zakrývá vinutí. U tohoto druhu magnetického obvodu jsou pak cívky umístěny na společném jádře. [5] [6]



Obr. 40 Možnosti uspořádání magnetického obvodu [6]

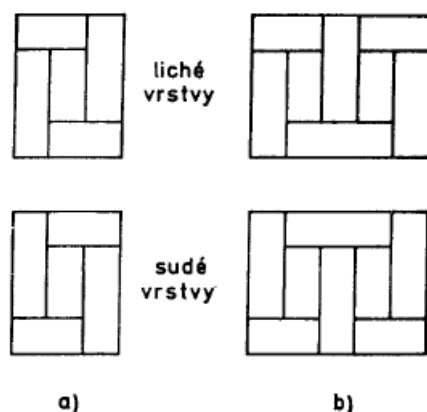
- a) Jednofázový jádrový transformátor
- b) Jednofázový plášťový transformátor
- c) Trojfázový jádrový transformátor
- d) Trojfázový plášťový transformátor

Magnetický obvod se zpravidla konstruuje z tzv. transformátorových plechů nejčastěji tloušťek 0,35 mm až nejvíce 0,5 mm a legovaných křemíkem pro minimalizaci ztrát z železe. Magnetický obvod má dvě základní části, jimiž jsou jádra, na nichž jsou umístěna vinutí, a spojka, která spojuje jednotlivá jádra. [5]



Obr. 41 Spojka a jádro magnetického obvodu [5]

Podle toho, jak jsou spolu tyto dvě části spojeny potom můžeme rozlišit magnetické obvody na obvody s tupým stykem a přeplátované. U tupého styku jsou jádra a spojky zkonstruovány samostatně a následně jsou spojeny pomocí stahovacích svorníků nebo sešroubovány. Tento způsob sice způsobuje větší ztráty v magnetickém obvodu vířivými proudy kvůli nedokonalostem ve spoji. Tupý styk je však daleko jednodušší na montáž, demontáž a údržbu. [5] [6]

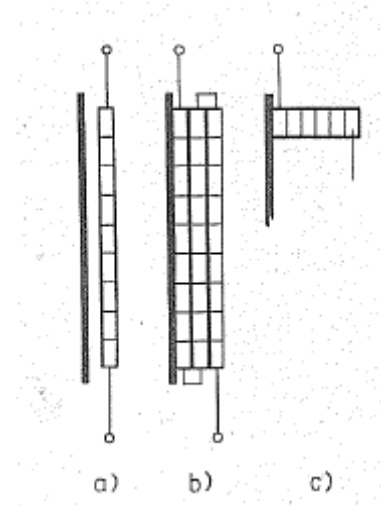


Obr. 42 Způsob skládání plechů pro přeplátovaný spoj [5]

a) Jednofázový obvod

b) Třífázový obvod

Vinutí transformátoru, aby bylo funkční a vyhovělo všem požadavkům, musí splňovat řadu kritérií. Jedná se pak především o mechanickou pevnost, elektrickou pevnost, technologickou proveditelnost, odolnost proti tepelnému namáhání a ekonomiku provozu. Způsobů provedení vinutí transformátorů je hned několik. Druh konstrukce vinutí je pak nejvíce ovlivněn především jmenovitými hodnotami proudu a napětí, na které je vinutí konstruováno. Volí se podle nich především průřez vodičů, který ovlivňuje proudovou hustotu ve vodiči. Provedení tvaru vodičů může být také více druhů. Máme vodiče s kruhovým průřezem a čtyřhranné, obdélníkové a čtvercové. Podle toho, jak je pak vodič navinut dělíme cívky na jednovrstvé, mnohovrstvé a deskové. A v neposlední řadě lze cívky rozdělit podle smyslu jejich vinutí na pravotočivé a levotočivé. [5] [6] [7]



Obr. 43 Druhy provedení cívek [6]

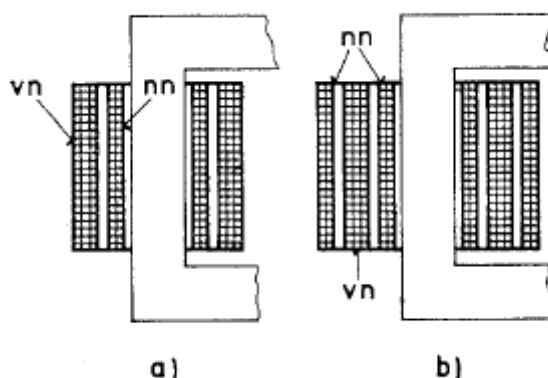
a) Jednovrstvá

b) Trojvrstvá

c) desková

Vinutí se pak liší i podle toho, v jaké poloze jsou vůči sobě umístěna vinutí na jednotlivých jádrech. Existují takzvaná vinutí souosá, kdy vinutí primární a sekundární cívky leží souose vůči jádru s

tím, že vinutí nižšího napětí se zpravidla umísťuje blíže k jádru a vinutí vyššího napětí se umísťuje vně. Souosé vinutí lze taky rozdělit na dělené souosé vinutí, jak je patrné na **Obr. 44**, kde je náčrt jak jednoduchého souosého vinutí, tak děleného dvojitého. [5] [6]



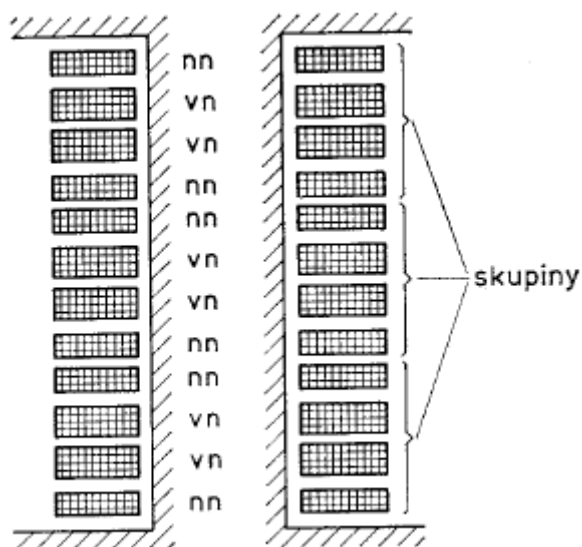
Obr. 44 Souosá vinutí [5]

a) Jednoduché

b) Dvojité

Vinutí nižšího napětí se umísťuje blíže k jádru především z důvodu nároků na pevnost a kvalitu izolace vinutí vůči kostře. U souosého vinutí děleného pak rozdělením vinutí sice získáme menší rozptylové pole, nároky na kvalitu a složitost provedení izolace znatelně stoupnou. [5]

Druhým způsobem provedení vinutí je vinutí prostřídané, jinak označované jako kotoučové nebo deskové. Části vstupního a výstupního vinutí se střídají ve směru jejich společné osy. Celé takovéto vinutí se pak rozdělí na skupiny. Tyto skupiny cívek vyššího a nižšího napětí se pak symetricky střídají. Prostřídaná vinutí mají menší rozptyl, jsou však opět náročnější na izolaci vzhledem k velkému počtu mezer mezi cívkami vyššího a nižšího napětí. Toto provedení je zobrazeno na **Obr. 45**. [5]



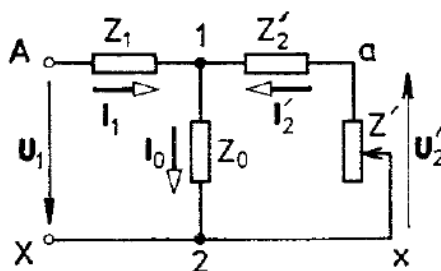
Obr. 45 Vinutí prostřídané [5]

3.2.2 Princip funkce transformátoru

Jak již bylo zmíněno výše, transformátor funguje na principu magnetické indukce, nedochází však v něm k žádnému točivému pohybu. Pokud na svorky transformátoru přivedeme střídavé napětí konstantní frekvence, vytvoří se na vstupní cívce indukované napětí u_{i1} . Toto indukované napětí vytváří magnetický tok, jež se mění s frekvencí sítě a indukuje na sekundární cívce napětí u_{i2} . Pokud na tuto cívku následně připojíme zátěž, bude touto cívkou procházet proud jež podle Lencova zákona bude orientovaný tak, aby vyvolával magnetický tok, jež bude působit proti magnetickému toku, kterým byl tento proud indukován. [6]

3.2.3 Náhradní schéma transformátoru

Při rozboru elektromagnetických stavů v obvodech s magnetickou vazbou je výhodné použít náhradní schémata, ve kterých se magnetická vazba nahrazuje elektrickým spojením. [5]



Obr. 46 Náhradní schéma transformátoru [5]

Toto jednoduché schéma je pro potřeby výpočtů proudových a napěťových podmínek za normálních stavů zcela dostačující. Impedance Z_1 a Z_2' v tomto schématu reprezentují impedance vstupního a výstupního vinutí. Ve schématu jsou elektricky spojeny, reálně však ne. Impedance Z_0 pak respektuje ztráty především magnetizačním proudem. Při zatíženích. Která se blíží jmenovitým hodnotám je pak proud I_0 pouze zanedbatelnou hodnotou proudu I_1 . Pokud je Z_0 konstantní, pak velice dobře reflektuje i ztráty v železe při změně zatížení. [5] [6]

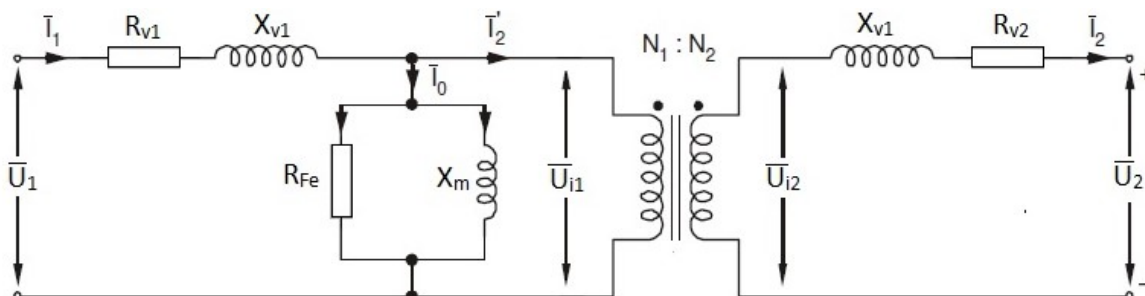
3.3 Konstrukce fázorového diagramu náhradního schématu jednofázového transformátoru v programu GeoGebra

Při konstrukci tohoto fázorového diagramu využijeme stejné postupy a znalosti, jako při konstrukci diagramů pro náhradní články vedení. Pro naše účely jsme použili parametry transformátorů ze zahraniční práce Parameter Estimation of Single Phase Core Type Transformer Using Bacterial Foraging Algorithm, jež se v zabývala způsoby měření právě těchto parametrů. V Tabulce 3. je tam možno nalézt velikost těchto parametrů měřených přímou metodou. Námi použité parametry budou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 3 Tabulka parametrů použitých ke konstrukci diagramu [8]

R_1 (Ω)	X_1 (Ω)	R_2 (Ω)	X_2 (Ω)	R_{Fe} (Ω)	X_m (Ω)
0,428	0,21	0,508	0,03	1437,5	294,8

Výsledný fázorový diagram je dostupný buď skrze vyhledávání na stránkách www.geogebra.org, nebo přímo přes odkaz <https://www.geogebra.org/m/qvzmjmr>. Tvar náhradního schématu, ze kterého celá konstrukce vychází je uveden na **Obr. 47** a na **Obr. 48** a **Obr. 49** jsou pak opět uvedené zápisy konstrukce z programu.



Obr. 47 Použité náhradní schéma jednofázového transformátoru

	Název	Hodnota	Popisek
1	Číslo S	$S = 10$	Měřítka proudu
2	Číslo X_m	$X_m = 294.8$	Reaktance magnetického obvodu (Ω)
3	Bod $U_{i2}(0, -230)$	$U_{i2} = (0, -230)$	Indukované napětí na výstupní straně
4	Bod $U_{i1}(0, 230)$	$U_{i1} = (0, 230)$	Indukované napětí na vstupní straně
5	Vektor u_{i1}	$u_{i1} = (0, 230)$	
6	Bod $I_2(-50, -100)$	$I_2 = (-50, -100)$	Proud zátěží
7	Číslo R_1	$R_1 = 0.428$	Odpor primárního vinutí (Ω)
8	Číslo R_2	$R_2 = 0.508$	Odpor sekundárního vinutí (Ω)
9	Číslo X_1	$X_1 = 0.21$	Reaktance primárního vinutí (Ω)
10	Číslo X_2	$X_2 = 0.03$	Reaktance sekundárního vinutí (Ω)
11	Číslo R_{Fe}	$R_{Fe} = 1437.5$	Odpor respektující ztráty v železe (Ω)
12	Vektor i_2	$i_2 = (-50, -100)$	
13	Vektor u_{i2}	$u_{i2} = (0, -230)$	
14	Bod $U_{R2}(2.54, -224.92)$	$U_{R2} = (2.54, -224.92)$	
15	Vektor u_{R2}	$u_{R2} = (-2.54, -5.08)$	Úbytek napětí odporu sekundárního vinutí
16	Bod $U_2(2.24, -224.77)$	$U_2 = (2.24, -224.77)$	Napětí na sekundární straně
17	Vektor u_2	$u_2 = (2.24, -224.77)$	
18	Bod $I_{Xm}(7.802, 0)$	$I_{Xm} = (7.802, 0)$	
19	Vektor i_{Xm}	$i_{Xm} = (7.802, 0)$	
20	Bod $I_{Fe}(7.802, 1.6)$	$I_{Fe} = (7.802, 1.6)$	Ztráty v železe
21	Vektor i_{Fe}	$i_{Fe} = (0, 1.6)$	
22	Vektor i_0	$i_0 = (7.802, 1.6)$	Magnetizační proud
23	Bod $I_2'(50, 100)$	$I_2' = (50, 100)$	
24	Vektor i_2'	$i_2' = (50, 100)$	
25	Bod $I_1(57.802, 101.6)$	$I_1 = (57.802, 101.6)$	Proud na primární straně transformátoru
26	Vektor i_1	$i_1 = (57.802, 101.6)$	
27	Bod $U_{R1}(2.474, 234.348)$	$U_{R1} = (2.474, 234.348)$	
28	Vektor u_{R1}	$u_{R1} = (2.474, 4.348)$	Úbytek napětí odporu primárního vinutí
29	Bod $U_1(0.34, 235.562)$	$U_1 = (0.34, 235.562)$	
30	Vektor u_{X1}	$u_{X1} = (-2.134, 1.214)$	Úbytek napětí reaktance primárního vinutí
31	Vektor u_1	$u_1 = (0.34, 235.562)$	Napětí na vstupu transformátoru
32	Vektor u_{X2}	$u_{X2} = (0.3, -0.15)$	Úbytek napětí reaktance sekundárního vinutí
33	Bod A	$A = (0, 0^\circ)$	Počátek souřadnicového systému
34	Úhel ϕ_1	$\phi_1 = 29.553^\circ$	Fázový posun na vstupní straně

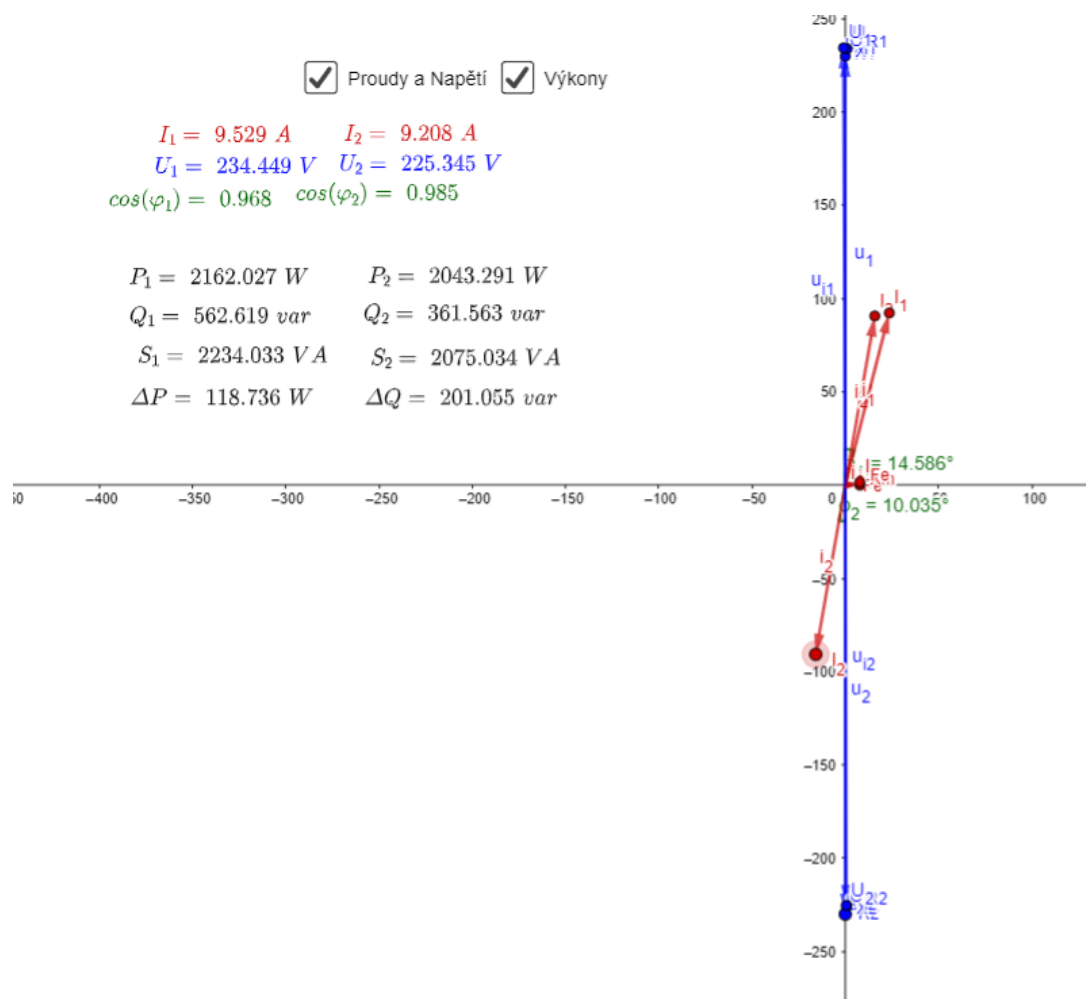
Obr. 48 Zápis konstrukce z programu GeoGebra od bodu 1 do bodu 34

35	Úhel φ_2	$\varphi_2 = 27.136^\circ$	Fázový posun na výstupní straně
36	Číslo P_2	$P_2 = 2236.5$	Činný výkon na výstupní straně
37	Číslo P_1	$P_1 = 2395.28$	Činný výkon na vstupní straně
38	Číslo Q_1	$Q_1 = 1358.137$	Jalový výkon na vstupní straně
39	Číslo Q_2	$Q_2 = 1146.25$	Jalový výkon na výstupní straně
40	Číslo S_1	$S_1 = 2753.526$	Zdánlivý výkon na vstupní straně
41	Číslo S_2	$S_2 = 2513.13$	Zdánlivý výkon na výstupní straně
42	Text text1	"I_1 = 11.689 A"	
43	Text text2	"I_2 = 11.18 A"	
44	Text text3	"U_2 = 224.781 V"	
45	Text text4	"U_1 = 235.563 V"	
46	Text text5	"cos(φ_1) = 0.87"	
47	Text text6	"cos(φ_2) = 0.89"	
48	Text text7	"P_1 = 2395.28 W"	
49	Text text8	"P_2 = 2236.5 W"	
50	Text text9	"Q_1 = 1358.137 var"	
51	Text text10	"Q_2 = 1146.25 var"	
52	Text text12	"S_2 = 2513.13 VA"	
53	Text text11	"S_1 = 2753.526 VA"	
54	Boolovská hodnota a	a = false	Proudy a Napětí
55	Boolovská hodnota b	b = false	Výkony

Obr. 49 Zápis konstrukce z programu GeoGebra od bodu 34 do bodu 55

3.3.1 Stručný popis postupu konstrukce

Při konstrukci tohoto fázorového diagramu vycházíme z proudu na výstupních svorkách a z indukovaného napětí U_{i2} . Do programu opět nadefinujeme všechny potřebné parametry a zvolíme vhodně měřítko tak, aby výsledek byl co nejpřehlednější. U tohoto fázorového diagramu bude napětí ve voltech a pro proud jsme zvolili měřítko $S=10$, tedy že všechny vektory proudů budou 10x větší. Když pak od indukovaného napětí U_{i2} odečteme úbytky napětí na prvcích R_{v2} a X_{v2} , získáme napětí na výstupních svorkách U_2 . Z indukovaného napětí U_{i2} pak jeho přepólováním na kladnou stranu osy x získáme indukované napětí na primární cívce. Konstruujeme s převodem transformátoru $p=1$. Z tohoto napětí pak vytváříme magnetizační proud I_0 . Nejprve pomocí normálového vektoru vytvoříme vektor proudu I_{xm} . Který respektuje ztráty ve vinutí, dále vytvoříme vektor proudu I_{Fe} jež zobrazuje ztráty v železe. Vektorovým součtem těchto dvou proudů získáme magnetizační proud. Následně přepóluje vektor i_2 . Tento vektor nazveme i_2' . Když pak následně k tomuto vektoru vektorovým součtem přičteme vektor magnetizačního proudu, získáme vektor proudu I_1 . Z tohoto proudu tekoucího primární cívkou pak opět můžeme vypočítat úbytky napětí na prvcích R_{v1} a X_{v1} a jejich vektorovým součtem s indukovaným napětím U_{i1} získáme napětí na vstupních svorkách transformátoru. Tím je hotov fázorový diagram. Zbývá, tak jako u diagramů náhradních článků, přidat výpočty výkonů, úhlů a výkonových ztrát a tyto hodnoty pak vhodně vynést na náčrtnu programu, aby byla pro uživatele co nejpřehlednější a nejjednodušší na pochopení základních sounáležitostí tohoto fázorového diagramu. Všechny tyto operace, jako jsou vkládání textu, ukotvování prvků na náčrtně nebo vytváření zaškrtávacích políček jsou popsány v kapitole 2.4.4.

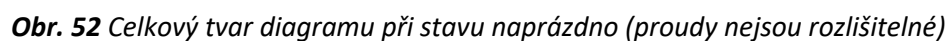


Obr. 50 Výsledný tvar fázorového diagramu

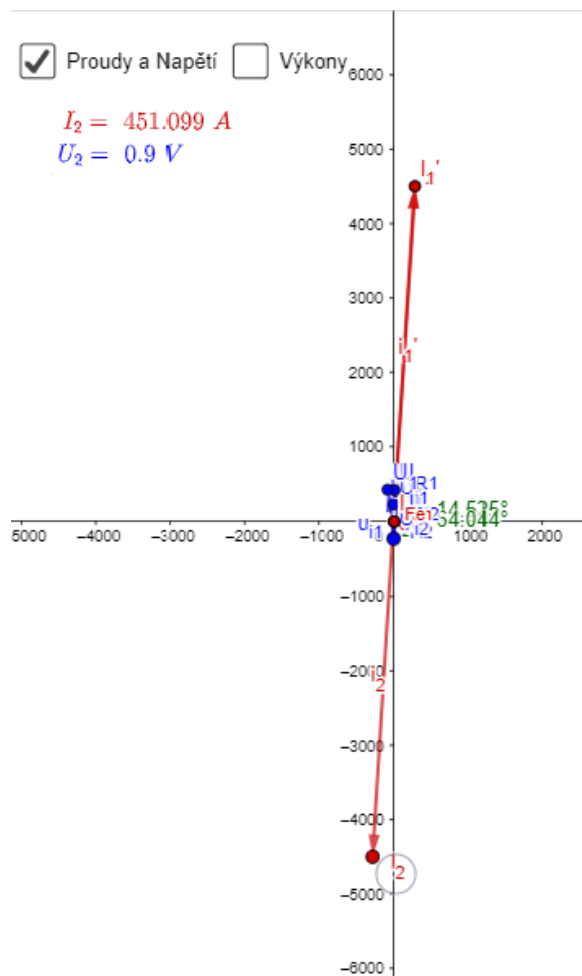
3.3.2 Publikace aktivit a úkoly pro studenty

Odkaz na tento článek je již uveden na začátku této kapitoly. Na to tomto odkazu je opět k dispozici stručný popis konstrukce, použité náhradní schéma a dva jednoduché úkoly při jejichž plnění by studenti nebo ostatní uživatelé mohli pozorovat jisté specifické vlastnosti transformátoru.

V prvním úkolu je zadáno zjistit, čemu bude odpovídat proud na vstupní straně transformátoru při chodu transformátoru naprázdno, tedy ve stavu $I_2 = 0$. Řešením je tedy přesunutí bodu I_2 do počátku souřadnicového systému a pak lze pozorovat, že při chodu transformátoru naprázdno je výstupní napětí rovno napětí indukovanému a proud primární cívkou je roven proudu magnetizačnímu. Tvar diagramu je vidět na obrázcích uvedených níže.



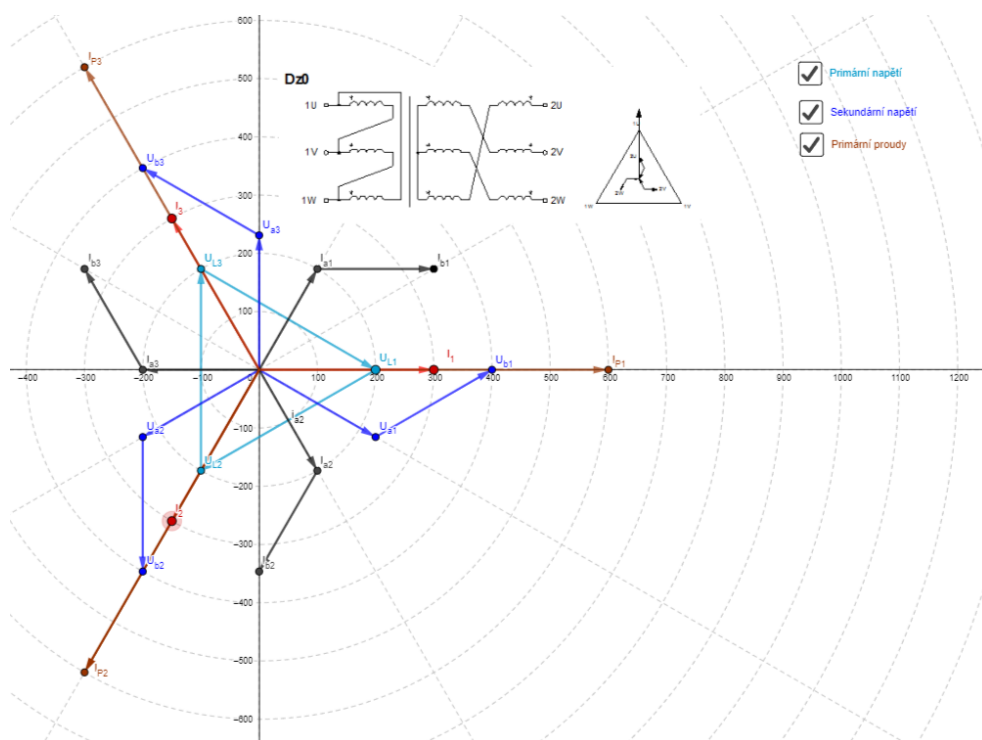
38



Obr. 53 Tvar diagramu při stavu blízkém stavu nakrátko

3.4 Diagram transformátoru Dz0

K tvorbě fázorového diagramu lze přistoupit z pohledu na ideální transformátor. Tedy že k tvorbě diagramu nebudeme využívat žádné naměřené hodnoty. Celý diagram pak bude vycházet pouze z teoretických znalostí. Tímto stylem lze například vytvořit diagram trojfázového transformátoru v zapojení trojúhelník – lomená hvězda s hodinovým úhlem 0 a nastavitelným převodem. V rámci tohoto diagramu pak má uživatel možnost sledovat, jaký vliv mají na funkci transformátoru změny jak napětí na primární straně, tak proudů zátěží. Lze také sledovat, jaký vliv bude na takovémto transformátoru mít nesymetrické proudové zatížení. Tento diagram pak je viditelný na **Obr. 54**, kde je převod transformátoru nastaven na $p = 2$.



Obr. 54 Fázorový diagram transformátoru Dz0

Na tomto diagramu může tedy uživatel pohybovat proudy na sekundární straně, tedy body I_1 , I_2 , I_3 a také měnit velikost sdruženého napětí na vstupní straně transformátoru. Článek také nabízí možnost skrytí jednotlivých vektorů pomocí zaškrťovacích políček tak, aby byl při hledání daných souvislostí diagram co nejpřehlednější.

4 Rozložení nesouměrné zátěže do složkové soustavy

4.1 Trojfázová soustava

Pro přenos elektrické energie střídavým proudem se nejčastěji používá právě soustava trojfázová. Ta poskytuje jak výhody, co se výroby točivým magnetickým polem, tak možností vícefázových zapojení týče. V praxi nejčastěji používáme soustavu trojfázovou symetrickou. Důležitost trojfázové soustavy je především v možnosti vytvoření točivého magnetického pole, což je základním kamenem principu fungování elektrických strojů.

4.2 Symetrická soustava

Trojfázová soustava je označována jako symetrickou ve chvíli, kdy jsou splněny dvě základní podmínky. Tedy fázový posun mezi jednotlivými fázemi je přesně 120° a amplitudy jednotlivých fází mají stejnou velikost. Obecně tedy musí platit rovnice 4.1, 4.2 a 4.3. V takovéto soustavě pak bude platit, že součet všech tří okamžitých hodnot napětí v daném čase bude roven nule.

$$u_A(t) = U_m \cdot \sin \omega t \quad (4.1)$$

$$u_b(t) = U_m \cdot \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \quad (4.2)$$

$$u_c(t) = U_m \cdot \sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \quad (4.3)$$

V trojfázové soustavě pak existují dva druhy napětí. Můžeme naměřit napětí fázové, značeno U_f , které měříme mezi fázovým vodičem a vodičem nulovým, nebo napětí sdružené, značeno U_s , které naměříme mezi dvěma odlišnými fázemi. Obecně pak mezi napětím fázovým a sdruženým platí vztah 4.4. jež je uveden níže.

$$U_s = \sqrt{3} \cdot U_f \quad (4.4)$$

[8]

4.3 Nesymetrická soustava

O soustavě mluvíme jako o nesymetrické ve chvíli, kdy jedna z podmínek symetricity není splněna. Tedy amplitudy jednotlivých fází nemají stejnou velikost, fázový posuv mezi nimi není přesně 120° , nebo oba případy. Pokud je soustava zapojena trojvodičově, dochází v jednotlivých fázích k přepětím, nebo podpětím. Pokud je soustava konstruována čtyřvodičově s nulovým vodičem, bude tímto vodičem procházet vyrovnávací proud. Rovnice jednotlivých fázových napětí pak mají následovný tvar.

$$u_a(t) = U_{ma} \cdot \sin(\omega t + \varphi_a) \quad (4.5)$$

$$u_b(t) = U_{mb} \cdot \sin(\omega t + \varphi_b) \quad (4.6)$$

$$u_c(t) = U_{mc} \cdot \sin(\omega t + \varphi_c) \quad (4.7)$$

Nesymetrie vzniká především zapojením jednofázových spotřebičů v trojfázové soustavě nebo poruchami přenosového vedení jako jsou jednofázový zemní zkrat, zkrat mezi dvěma fázemi nebo například zemní spojení. Tato nesymetrie se projevuje vyrovnávacím proudem v nulovém vodiči. Tato proudová nesymetrie následně vyvolává i nesymetrii napěťovou. [9] [10]

4.4 Složková soustava

Každou nesymetrickou zátěž lze lineární transformací rozložit na 3 symetrické třífázové soustavy. Tyto soustavy se nazývají sousledná (1), zpětná (2) a nulová (0). U sousledné soustavy posunujeme fázory o 120° a její sled fází je stejný jako sled fází nahrazované soustavy, zpětná soustava tyto fázory posouvá taktéž o 120° , ale má opačný sled fází než soustava nahrazovaná a nulová soustava nemá mezi svými fázory žádný fázový posun.

Každá z těchto složek má určený reálný význam a lze ji měřit. Sousledná složka je tvořena synchronními a asynchronními generátory a nemá na soustavu negativní vlivy. Zpětná složka pak může způsobovat přehřívání synchronních a asynchronních motorů. Nulová složka zase způsobuje zvýšení přenosových ztrát v nulových vodičích a jednosměrnou magnetizaci transformátorových jader.

Měřením, nebo výpočtem těchto složek nesymetrie můžeme následně určovat kvalitu symetrie soustavy. Zavádíme tzv. činitel nesymetrie, který vypočteme dle rovnice (4.8). [9] [10]

$$\rho_u = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \quad (4.8)$$

Norma ČSN EN 50160 pak hovoří o nárocích na symetrii soustavy takto:

„Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 98 % desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky (základní) napájecího napětí v rozsahu 0 až 2 % sousledné složky.“ [11]

4.5 Přepočítání do složkové soustavy

Při rozkladu nesouměrné zátěže do složkové soustavy vychází z lineární transformace. Součet fázorů všech složek musí být ve výsledku roven vektoru nesymetrickému. Platí tedy:

$$U_A = U_{A(1)} + U_{A(2)} + U_{A(0)} \quad (4.9)$$

$$U_B = U_{B(1)} + U_{B(2)} + U_{B(0)} \quad (4.10)$$

$$U_C = U_{C(1)} + U_{C(2)} + U_{C(0)} \quad (4.11)$$

Pokud tuto soustavu převedeme do maticového zápisu a budeme uvažovat teoretické předpoklady za platné, můžeme uvést vztah 4.12

$$U_{ABC} = T \cdot U_{120} \quad (4.12)$$

Kde T je desymetrizační matice. Pro tuto matici platí:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a & a^2 & 1 \\ a^2 & a & 1 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

Kde a je operátor natočení jehož hodnota je:

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4.14)$$

Pokud zápis provedeme kompletně maticově:

$$\begin{pmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a & a^2 & 1 \\ a^2 & a & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Nyní pro získání rovnic k přepočtu do složkové soustavy provedeme inverzi této matice a získáme:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

Z rovnice 4.16 nyní lze odvodit soustavu rovnic použitelnou pro výpočet hodnot jednotlivých složek referenční fáze A.

$$U_1 = \frac{1}{3} \cdot (U_A + a \cdot U_B + a^2 \cdot U_C) \quad (4.17)$$

$$U_2 = \frac{1}{3} \cdot (U_A + a^2 \cdot U_B + a \cdot U_C) \quad (4.18)$$

$$U_0 = \frac{1}{3} \cdot (U_A + U_B + U_C) \quad (4.19)$$

Tímto vypočteme polohu a velikost jednotlivých složek, jež připadají fázi A o níž mluvíme jakožto o fázi referenční. Zbylé vektory jednotlivých složek pro zbylé fáze, kromě nulové složky, jež je pro všechny fáze stejná, dopočteme pomocí rovnic uvedených níže. Pro zbylé sousledné složky tedy platí:

$$U_{B(1)} = a^2 \cdot U_1 \quad (4.20)$$

$$U_{C(1)} = a \cdot U_1 \quad (4.21)$$

A pro zpětné složky platí:

$$U_{B(2)} = a \cdot U_2 \quad (4.22)$$

$$U_{C(2)} = a^2 \cdot U_2 \quad (4.23)$$

[9] [10]

4.6 Tvorba diagramu v programu GeoGebra

Při tvorbě tohoto fázorového diagramu opět budeme využívat stejné znalosti jako pro tvorbu předchozích aktivit. Jediný rozdíl je ten, že tentokrát budeme využívat matematických operací s komplexními čísly. Dále pro potřeby tohoto diagramu nepotřebuje nastavit žádné parametry zátěže a nemusíme tedy pro reálnost diagramu využívat žádných referenčních naměřených parametrů jako u náhradních článků vedení nebo fázorového diagramu transformátoru. Vycházíme tedy z rovnic obsažených v kapitole 4.5. Na **Obr. 55** a **Obr. 56** jsou vidět snímky obrazovky z programu na nichž je zápis konstrukce pro tvorbu v jednotlivých bodech tak, jak se při tvorbě postupovalo.

	Název	Hodnota	Popisek
1	Bod $U_A(584.65, -102.9)$	$U_A = (584.65, -102.9)$	Napětí první fáze
2	Bod $U_B(-393.81, -450.18)$	$U_B = (-393.81, -450.18)$	Napětí druhé fáze
3	Bod $U_C(-317.26, 445.95)$	$U_C = (-317.26, 445.95)$	Napětí třetí fáze
4	Komplexní číslo a	$a = -0.5 + 0.87i$	Operátor natočení
5	Bod $U_0(-42.14, -35.71)$	$U_0 = (-42.14, -35.71)$	Netočivá složka referenční fáze A
6	Komplexní číslo $U_1 572.09 - 55.69i$	$U_1 = 572.09 - 55.69i$	Sousledná složka referenční fáze A
7	Komplexní číslo $U_2 54.7 - 11.5i$	$U_2 = 54.7 - 11.5i$	Zpětná složka referenční fáze A
8	Vektor $u_{A(1)}$	$u_{A(1)} = (572.09, -55.69)$	Vektor sousledné složky fáze A
9	Vektor $u_{A(0)}$	$u_{A(0)} = (-42.14, -35.71)$	Vektor netočivé složky fáze A
10	Vektor $u_{B(0)}$	$u_{B(0)} = (-42.14, -35.71)$	Vektor netočivé složky fáze B
11	Vektor $u_{C(0)}$	$u_{C(0)} = (-42.14, -35.71)$	Vektor netočivé složky fáze C
12	Vektor $u_{B(1)}$	$u_{B(1)} = (-334.28, -467.6)$	Vektor sousledné složky fáze B
13	Vektor $u_{C(1)}$	$u_{C(1)} = (-237.81, 523.29)$	Vektor sousledné složky fáze C
14	Vektor $u_{A(2)}$	$u_{A(2)} = (54.7, -11.5)$	Vektor zpětné složky fáze A
15	Vektor $u_{B(2)}$	$u_{B(2)} = (-17.4, 53.12)$	Vektor zpětné složky fáze B
16	Vektor $u_{C(2)}$	$u_{C(2)} = (-37.31, -41.63)$	Vektor zpětné složky fáze C
17	Úhel $\phi_{(1)(2)}$	$\phi_{(1)(2)} = 6.31^\circ$	Posun mezi (1) a (2) fáze A
18	Úhel $\phi_{(1)(0)}$	$\phi_{(1)(0)} = 134.16^\circ$	Posun mezi (1) a (0) fáze A
19	Text text5	" $\phi_{(1)(0)} = 134.16^\circ$ "	
20	Vektor u_A	$u_A = (584.65, -102.9)$	Vektor napětí první fáze
21	Vektor u_B	$u_B = (-393.81, -450.18)$	Vektor napětí druhé fáze
22	Vektor u_C	$u_C = (-317.26, 445.95)$	Vektor napětí třetí fáze
23	Text text6	" $U_A = 593.64 \text{ V}$ "	
24	Text text7	" $U_B = 598.12 \text{ V}$ "	
25	Text text8	" $U_C = 547.29 \text{ V}$ "	
26	Úhel $\phi_{(A)(1)}$	$\phi_{(A)(1)} = 355.58^\circ$	Posun mezi fází A a její (1) složkou
27	Úhel $\phi_{(B)(1)}$	$\phi_{(B)(1)} = 5.62^\circ$	Posun mezi fází B a její (1) složkou
28	Úhel $\phi_{(C)(1)}$	$\phi_{(C)(1)} = 10.99^\circ$	Posun mezi fází C a její (1) složkou
29	Boolovská hodnota b	$b = \text{false}$	Zobrazit nesouměrnou zátěž
30	Boolovská hodnota c	$c = \text{true}$	Zobrazit sousledné složky
31	Boolovská hodnota d	$d = \text{true}$	Zobrazit zpětné složky
32	Boolovská hodnota e	$e = \text{true}$	Zobrazit nulové složky
33	Text text9	" $\phi_{(A)(1)} = 355.58^\circ$ "	
34	Text text10	" $\phi_{(B)(1)} = 5.62^\circ$ "	
35	Text text11	" $\phi_{(C)(1)} = 10.99^\circ$ "	
36	Text text4	" $\phi_{(A)(2)} = 6.31^\circ$ "	

Obr. 55 Zápis konstrukce pro rozklad do složkové soustavy od bodu 1 do bodu 36

37	Boolovská hodnota f	$f = \text{false}$	Velikosti napětí
38	Boolovská hodnota g	$g = \text{false}$	Fázové posuny
39	Text text1	" $U_{(A)(1)} = U_{(B)(1)} = U_{(C)(1)} = 574.79 \text{ V}$ "	
40	Text text3	" $U_{(A)(0)} = U_{(B)(0)} = U_{(C)(0)} = 55.23 \text{ V}$ "	
41	Text text2	" $U_{(A)(2)} = U_{(B)(2)} = U_{(C)(2)} = 55.9 \text{ V}$ "	
42	Číslo p	$p = 0.1$	Činitel nesouměrnosti
43	Text text12	" $p = 9.73 \%$ "	
44	Boolovská hodnota h	$h = \text{false}$	Činitel nesouměrnosti

Obr. 56 Zápis konstrukce pro rozklad do složkové soustavy od bodu 37 do bodu 44

4.6.1 Popis postupu konstrukce

Začneme nadefinováním tří bodů, jež budou reprezentovat rozložení a velikost amplitud jednotlivých fází A, B a C. Těmito body bude možno volně pohybovat a GeoGebra podle těchto vstupních hodnot napětí bude dopočítávat velikosti a natočení jednotlivých symetrických složkových soustav. Když máme nadefinovány body U_A , U_B a U_C , zbývá pouze nadefinovat operátor natočení a . Zde poprvé pracujeme s komplexními čísly, zápis do vstupního pole tedy provedeme dle rovnice v kapitole 4.5. Zápis do vstupního pole pro operaci s komplexními čísly je vidět níže na **Obr. 57**

Obr. 57 Zápis do vstupního pole programu

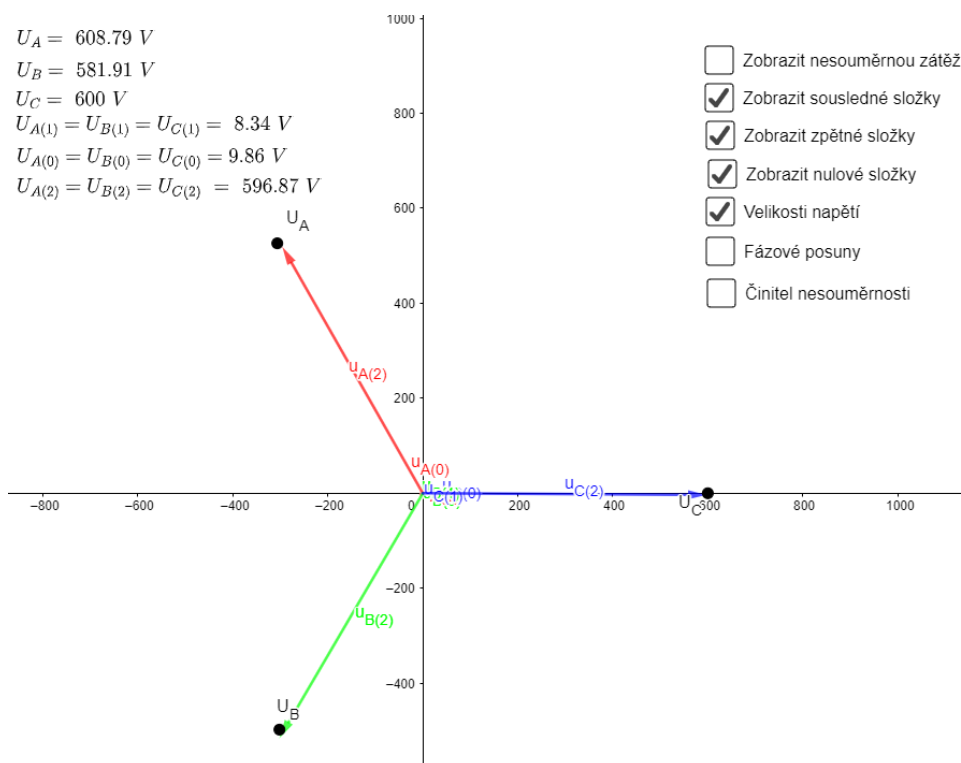
Pokračujeme výpočtem bodů zobrazujících napětí jednotlivých složek referenční fáze A. Těmi jsou body U_0 , U_1 a U_2 . To provedeme zadáním rovnic z předchozí kapitoly do vstupního pole. Následně vytvoříme vektory jdoucí z počátku souřadnicového systému do těchto vypočtených bodů. Pro bod U_0 platí, že je vždy pro všechny 3 fáze totožný, mezi jednotlivými fázemi není pro netočivou složku žádný fázový posun. Vytvoříme zbylé dvě složky fáze A, tedy vektor sousledné složky $u_{A(1)}$ jdoucí opět z počátku do bodu U_1 a vektor zpětné složky $u_{A(2)}$ jdoucí z počátku souřadnicového systému do bodu U_2 . Tím máme rozloženou fázi A na složkovou soustavu a zbývá vytvořit vektory sousledných a zpětných složek pro fáze B a C. To opět provedeme zadáním rovnic z předešlé kapitoly do parametrů vektoru definovaného počátkem souřadnicového systému a konečného bodu. Tím je rozložení nesouměrné zátěže hotovo. Uživatel nyní může volně pohybovat body, jež jsme definovali na začátku a sledovat, jak se nastavený tvar nesouměrné zátěže do složkové soustavy rozloží. V posledním kroku konstrukce samotného diagramu zadáme do vstupního pole parametr ρ , jež reprezentuje činitel nesouměrnosti.

V poslední části ještě nadefinujeme úhly, které dávají uživateli obecný přehled. Vypočteme tedy úhly mezi souslednou a zpětnou složkou referenční fáze, mezi vektory sousledné a nulové složky a úhel mezi celkovou a nulovou složkou (tento pro všechny 3 fáze). V poslední části už jen uživatelsky přizpůsobíme článek. Přidáme text zobrazující velikosti jednotlivých napětí a úhly a přidáme zaškrtačací tlačítka pro možnost skrytí tohoto textu, skrytí nebo zobrazení daných vektorů tak, aby si uživatel mohl zobrazit dané sounáležitosti co nejprehledněji.

4.6.2 Publikace aktivit a úkoly pro studenty

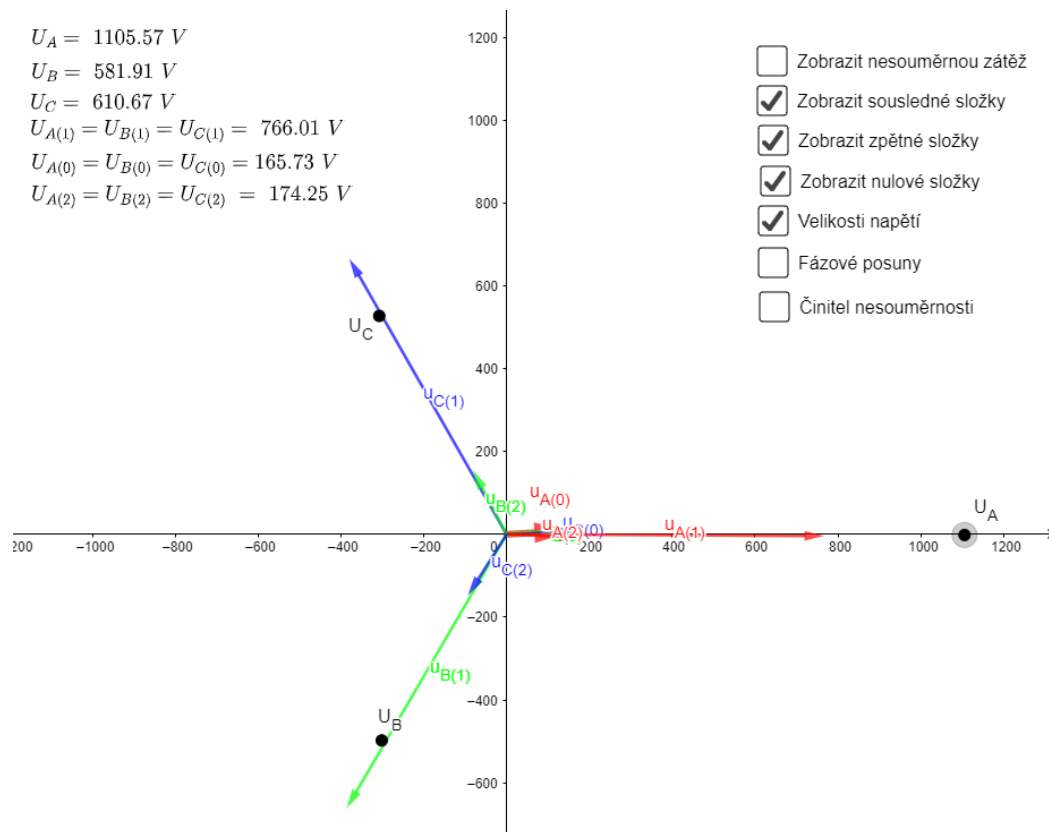
Tato aktivita je opět k dispozici přímo skrze vyhledávání na stránkách GeoGebry nebo skrze přímý odkaz <https://www.geogebra.org/m/dazgbamy>. Po přechodu na aktivitu na stránkách je kromě appletu se samotným diagramem k dispozici i velmi stručný teoretický rozbor, popis značení objektů na nákresně a skupina úkolů, které by měly uživateli pomoci lépe pochopit některé sounáležitosti.

Prvním úkolem je najít stav, ve kterém dojde k úplnému nahrazení složek sousledných složkami zpětnými. Tohoto stavu docílíme, pokud prohodíme dvě fáze. Tento stav je vidět na obrázku níže, kde jsme zaměnili fázi A a C. Zátěž na obrázku však není úplně symetrická, nedorazí tedy ke snížení sousledné složky přesně na nulu, ale tomuto stavu se velmi blíží.



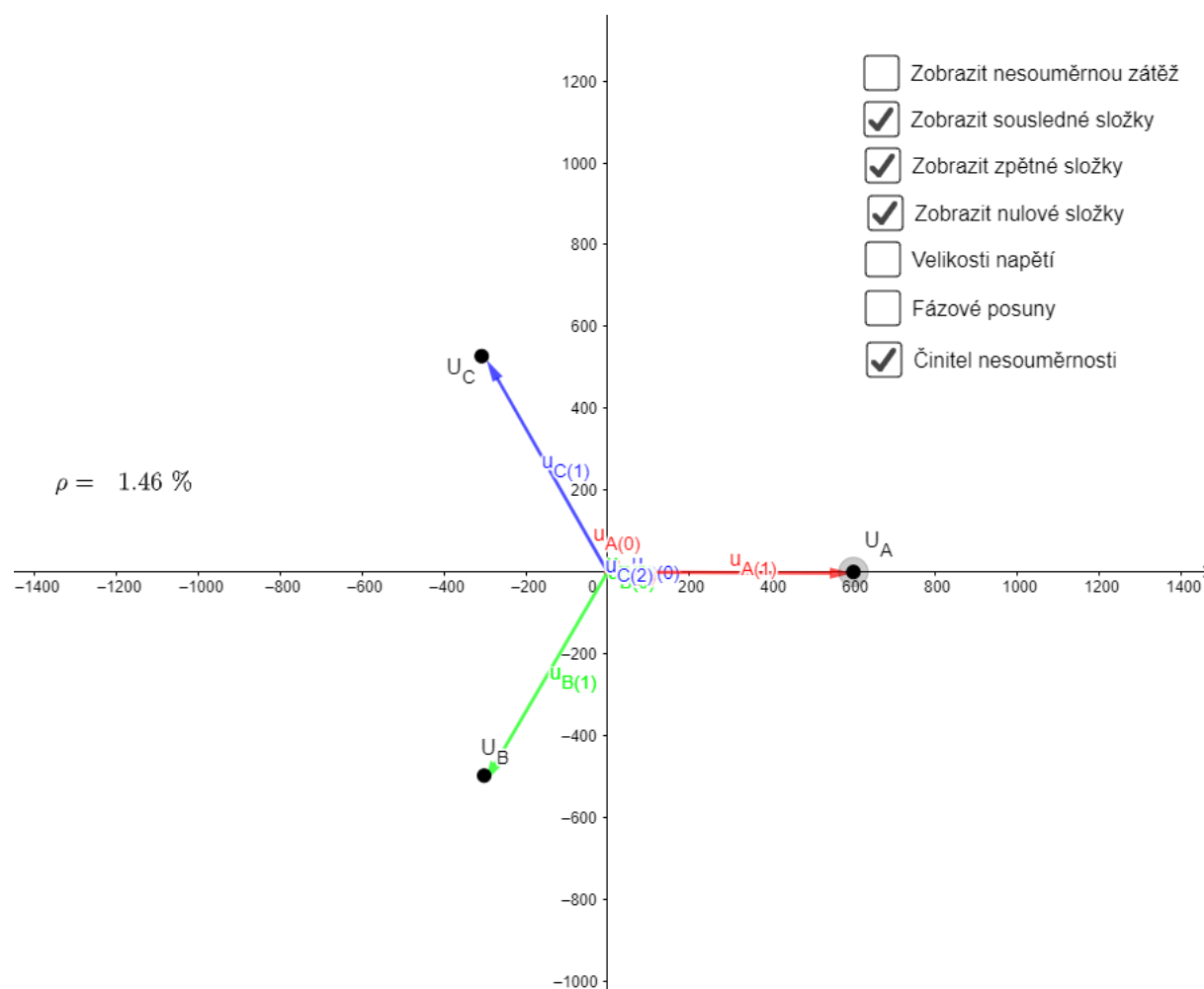
Obr. 58 Složková soustava při prohození sledu fází

Druhým úkol spočívá v sledování zákonitostí, při vzniku přepětí v jedné fázi. Pro demonstraci tedy Nastavíme zátěž co nejbližší stavu symetrie a napětí U_A posune po ose na vyšší hodnotu. V takovém případě je na tvaru složek vidět, jak se jednotlivé složky zvětšují, aby tuto nesymetrii vyrovnaly a je zde nejpřesněji pozorovatelné, jak se vektorovým součtem dané vektory napětí složí do výsledného stavu reprezentujícího nesymetrickou zátěž.



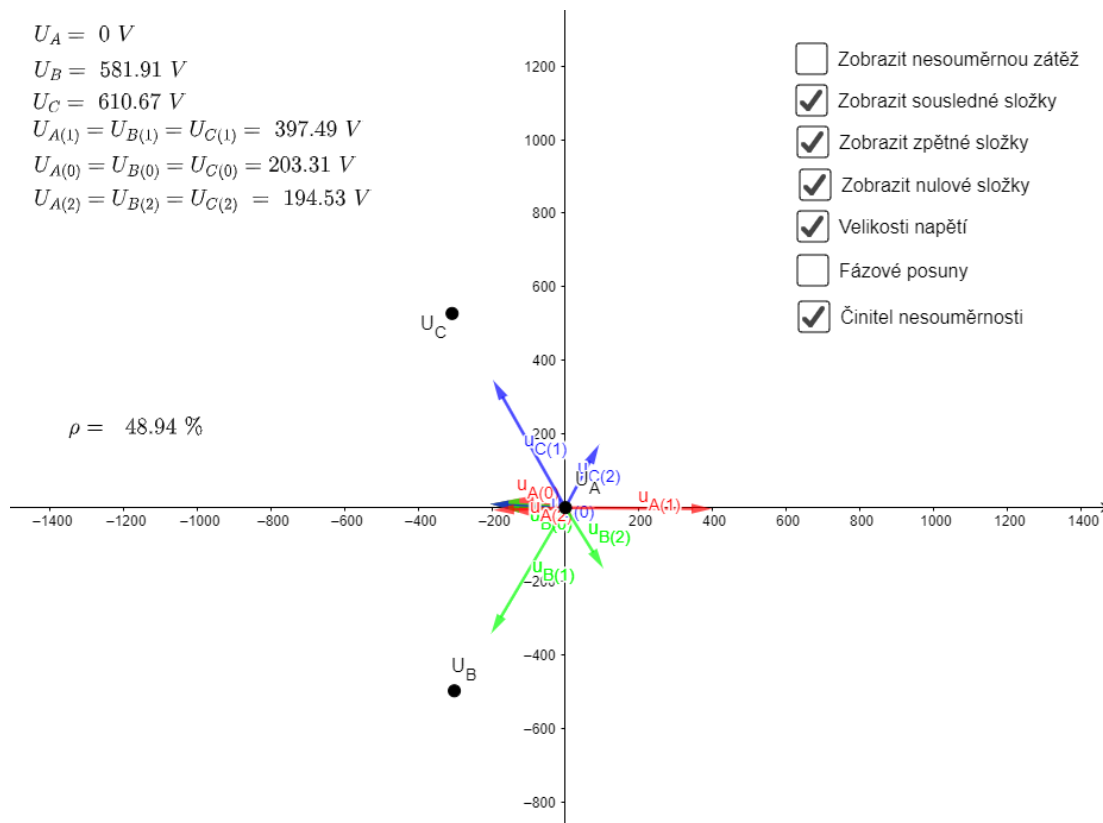
Obr. 59 Složková soustava při přepětí jedné fáze

Třetím úkolem je najít pohybem bodů stav, kdy bude soustava vyhovovat normám o symetrii soustavy, tedy že činitel nesouměrnosti nepřesáhne 2%.



Obr. 60 Složková soustava při téměř symetrické zátěži

Posledním úkolem je nastavit stav, který bude reflektovat výpadek jedné fáze. Libovolný bod reprezentující fázové napětí tedy přeneseme do počátku souřadnicového systému a budeme sledovat výsledek.



Obr. 61 Složková soustava při výpadku jedné fáze

5 Závěr

Výsledkem této práce je grafický výstup několika interaktivních fázorových diagramů. Všechny tyto diagramy jsou dostupné jak skrze můj osobní profil na stránkách www.geogebra.org tak skrze odkazy uvedené v jednotlivých kapitolách o publikaci. Každá publikovaná aktivita obsahuje i vlastní stručný teoretický rozbor, vysvětlivky značení veličin a několik úkolů pro uživatele sloužících k lepšímu pochopení jednotlivých sounáležitostí. Každá kapitola pak obsahuje podrobný popis postupu při tvorbě, který by mohl sloužit i jako návod pro tvorbu dalších samostatných diagramů nebo jiných aktivit. Vzhledem k tomu, jak podrobně je popsána tvorba diagramu náhradního Steinmetzova článku, v dalších kapitolách je již popis konstrukce značně zjednodušený jak vzhledem k rozsáhlosti této práce, tak s ohledem na to, že při další tvorbě dochází pouze k opakování podobných postupů. Tedy již není nutné podrobně popisovat způsoby práce s programem ale pouze pořadí, v jakém jednotlivé úkony provádět.

V první kapitole se práce věnuje tvorbě fázorových diagramů náhradních schémat dlouhých vedení. Kapitola obsahuje podrobný popis fungování programu v rámci této tvorby. Popis konstrukce je uveden pouze pro jeden ze čtyř vytvořených článků. Popis konstrukce se věnuje Steinmetzovu článku, jelikož se jedná o konstrukčně nejsložitější článek ze všech. Cílem popisu konstrukce je předání získaných zkušeností při práci s tímto programem čtenáři této práce, jež by na základě získaných znalostí měl být schopen vytvořit aktivitu vlastní. Na konci kapitoly je pak uvedena tabulka sloužící ke srovnání přesnosti jednotlivých článků. Výsledky této tabulky pak shodně reflektují teoretický předpoklad přesnosti jednotlivých článků pro dané délky vedení.

Ve druhé kapitole se práce věnuje tvorbě nejprve fázorového diagramu reálného transformátoru, jehož parametry jsou uvedeny v **Tab. 3**. Transformátor byl konstruován s převodem $p=1$. Diagram správně reflektuje chod v zatížení jmenovitým proudem I_2 , kdy lze sledovat dobrou účinnost transformátoru z hlediska velikosti výkonových ztrát. V rámci úkolů je pak možno nastavit tento transformátor do stavu bez zatížení (naprázdno). V tomto případě diagram přesně reflektuje situaci a diagram zcela odpovídá teoretickému předpokladu. V druhém úkolu nastavení transformátoru do stavu zkratu zátěže (nakrátko) je diagram taktéž schopen do jisté míry reflektovat toto zapojení. Ne však ve všech bodech, jelikož diagram neomezuje maximální zkratový výkon transformátoru a proud I_2 tak lze nastavit nad hodnotu, jež by bylo reálné dosáhnout a hodnoty v tomto bodě tedy přestávají dávat smysl. Pro sledování sekundární strany transformátoru a sounáležitostí v rámci zvětšování úbytků na hodnotu, kdy napětí na sekundární straně dosáhne nuly je však diagram dostačující. Ve druhé části, tedy diagramu ideálního transformátoru v zapojení trojúhelník – lomená hvězda s hodinovým úhlem 0 je pak vidět druhý způsob zobrazování problematiky náhradních schémat. V tomto případě nerespektujeme ztráty transformátoru, není třeba do článku zadávat jakékoli reálné hodnoty. Pracujeme tedy s ideálním transformátorem, jehož jedinou definiční veličinou je jeho převod.

V poslední kapitole je graficky zobrazena problematika nesouměrné zátěže a jejího převedení na symetrickou složkovou soustavu. Publikace této aktivity opět obsahuje stručný teoretický rozbor, několik úkolů pro uživatele a samotný diagram. V rámci tohoto diagramu si uživatel může nastavit libovolný tvar nesymetrické zátěže a sledovat jaký tvar bude mít soustava složková. Článek také sám vypočítává činitel napěťové nesymetrie uživatelem zvolené soustavy. V rámci úkolů uživatel nastavuje několik různých stavů, jež mohou v trojfázové soustavě nastat a lze pak na hodnotách vypočítat, proč se přepočít do složkové soustavy realizuje a z jakého důvodu se na trojfázových rozvodech velikosti jednotlivých složek měří.

Seznam použité literatury

- [1] TZB-info [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>
- [2] HODINKA, FECKO, NĚMEČEK. *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00065-3.
- [3] VARGA, L. *Modely prvků elektrizační soustavy*.
- [4] RUDOLF, Ladislav. *Vliv svodu na výpočty chodu sítě u vedení VVN a ZVN*. Ostrava, 2009.
- [5] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 1*. 3. oprav a dopl. Praha: nakladatelství Československé akademie věd, 1980. ISBN 21-045-80.
- [6] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje: 1. Elektrické stroje*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1982. ISBN 04-520-82.
- [7] BAŠTA, J., J. CHLÁDEK a I. MAYER. *Teorie elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1968. ISBN 04-518-68.
- [8] PADMA, Seeni. *Parameter Estimation of Single Phase Core Type Transformer Using Bacterial Foraging Algorithm*. 2010. Annamalai University.
- [9] FIALA, Miroslav, Václav VRÁNA a Ctirad KOUDELKA. *Trojfázové obvody*. Ostrava, 2004.
- [10] ŠACH, Jaroslav. *Model Nesymetrické zátěže*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Vladislav Sítař.
- [11] ČSN EN 50160 *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Ed. 3.
- [12] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [13] MATĚJKA, Ondřej. *Poruchy přerušení fáze při napájení jaderné elektrárny*. Praha. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Stanislav Bouček.

Seznam příloh

Všechny aktivity jsou dostupné a dohledatelné na webu www.geogebra.org nebo přístupné skrze odkazy níže.

- | | | |
|-----|--------------------|---|
| [1] | T článek | https://www.geogebra.org/m/xtaa5pra |
| [2] | π článek | https://www.geogebra.org/m/qhw39m7v |
| [3] | Γ článek | https://www.geogebra.org/m/vjdkzv4t |
| [4] | Steinmetzův článek | https://www.geogebra.org/m/rbfgpr64 |
| [5] | 1f transformátor | https://www.geogebra.org/m/qvvzmjur |
| [6] | Složková soustava | https://www.geogebra.org/m/dazgbamy |